UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Analisi parametrica dell'effetto dell'isola di calore su un distretto urbano di Padova

Relatore: Prof. Angelo Zarrella

Correlatore: Ing. Enrico Prataviera

Correlatore: Ing. Pierdonato Romano

Laureando: Nicolò Caltran

matricola n°1205737

Anno Accademico 2020/2021

SOMMARIO

INTRODUZIONE **5**

CAPITOLO 1 ..... **11**

1.1 La modellizzazione urbana 11

1.2 Isola di calore urbana 15

1.2.1 Metodologie per la valutazione dell'Urban Heat Island 17

CAPITOLO 2 ..... **21**

2.1 Il modello di simulazione dell'Urban Heat Island 21

2.1.1 Modello della zona rurale (RSM) 22

2.1.2 Modello della distribuzione verticale della temperatura dell'aria (VDM) 23

2.1.3 Modello dello strato atmosferico sopra il canyon cittadino (UBL) 24

2.1.4 Modello del canyon cittadino (UC) 26

2.2 Modelli di valutazione del calore rilasciato dagli impianti di condizionamento 31

2.2.1 Equazione polinomiale empirica 32

2.2.2 Confronto tra la polinomiale e la norma UNI/TS 11300-3 33

2.3 Modello di valutazione del calore antropogenico 36

2.4 Modello della zona termica 39

2.5 Modello per la valutazione del riscaldamento globale 41

CAPITOLO 3 ..... **47**

3.1 Il caso di studio analizzato 47

3.2 Il modello RC 48

3.3 Il codice di calcolo EUReCA 49

3.3.1 Flusso di lavoro 50

3.3.2 Dati di input ed assunzioni in fase di pre-processing 51

3.3.3 Unione tra il modello EUReCA e il modello dell'UHI 55

3.3.4 Simulazione energetica 58

CAPITOLO 4 61

4.1 Analisi dei risultati 61

4.2 Effetto di diversi parametri sull'isola di calore 70

4.2.1 Il coefficiente di assorbimento per le pareti esterne degli edifici e la strada 71

4.2.2 Variazione dell'efficienza nominale degli impianti HVAC 76

4.2.3 Variazione del traffico 79

4.2.4 Variazione della densità di vegetazione 81

4.2.5 Sostituzione degli impianti HVAC con sonde geotermiche 84

4.3 Effetto della combinazione di alcuni parametri sull'isola di calore 88

4.4 Combinazione degli effetti del riscaldamento globale e dell'isola di calore 91

CONCLUSIONI 95

BIBLIOGRAFIA 99

RINGRAZIAMENTI 103

INTRODUZIONE

Il mondo sta diventando sempre più urbanizzato. Dal 2007 più della metà della popolazione mondiale vive nelle città e tale quota dovrebbe salire nel 2030, raggiungendo il 60%. Le città e le aree metropolitane sono il motore della crescita economica, contribuendo per circa il 60% al PIL mondiale. Tuttavia, esse sono responsabili di circa il 70% delle emissioni globali di anidride carbonica e di oltre il 60% dell'uso delle risorse energetiche, risultando quindi uno dei settori chiave per l'efficienza energetica.

I valori di crescita futuri della popolazione urbana sono avvalorati dalle serie storiche, che mostrano un incremento repentino nell'ultimo decennio; difatti, dopo aver raggiunto il primo miliardo di abitanti nel 1959, ci sono voluti 26 anni per arrivare a due miliardi nel 1985, altri 17 per arrivare a tre miliardi nel 2002 e solo 13 anni per raggiungere quattro miliardi nel 2015. Secondo i modelli attuali, la crescita della popolazione urbana dovrebbe continuare, in maniera tale che la popolazione del mondo raggiungerà 5 miliardi nel 2028 e 6 miliardi nel 2041. A differenza di questa continua tendenza di crescita, si ritrova un andamento inverso per quanto riguarda la popolazione rurale del mondo, la quale ha raggiunto 2 miliardi nel 1960, 3 miliardi nel 1989 e si stima che inizierà a calare dopo il 2021, non raggiungendo i 4 miliardi [1].

La rapida urbanizzazione sta provocando un numero crescente di volume costruito, con infrastrutture e servizi inadeguati (come la raccolta dei rifiuti, i sistemi idrici e fognari), aggravando l'inquinamento atmosferico e l'espansione urbana non programmata. Per rispondere a queste sfide, 150 paesi hanno sviluppato piani urbani nazionali, di cui quasi la metà si trovano nella fase di attuazione, aiutando così le città a crescere in modo più sostenibile e inclusivo.

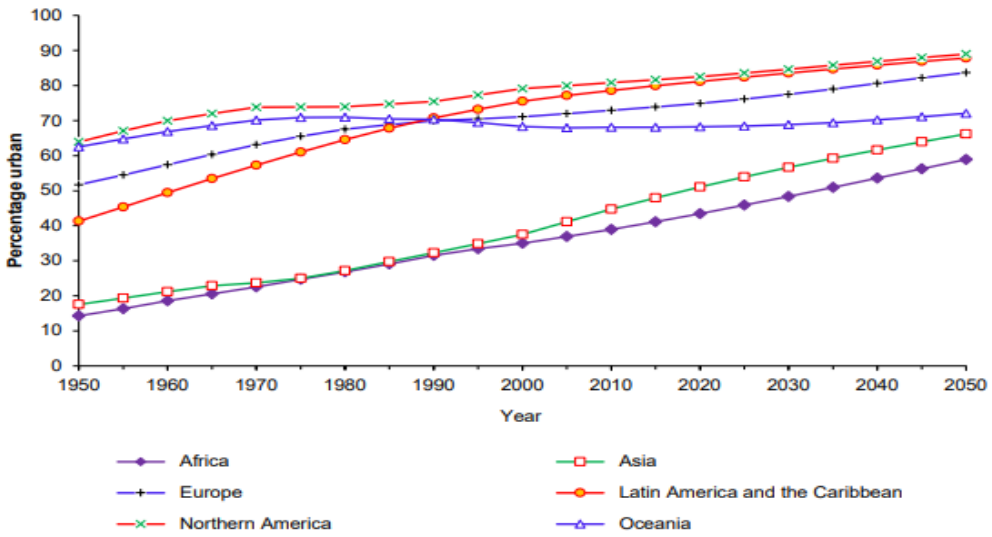


Figura 1: Percentuale della popolazione residente nelle aree urbane, 1950-2050 - Fonte The 2018 Revision of UN

Il fenomeno legato alla migrazione verso zone urbane oltre a creare diversi problemi di natura logistica ed economica, sta causando una sovra densità di popolazione nelle città e metropoli. Tale effetto deve esser attentamente controllato e regolato da misure tecniche ed economiche al fine di garantire una forte efficienza energetica nelle nuove costruzioni immobiliari, le quali rappresentano già oggi il terzo settore con maggior emissione di gas ad effetto serra, sia per via diretta che soprattutto per via indiretta. [2]

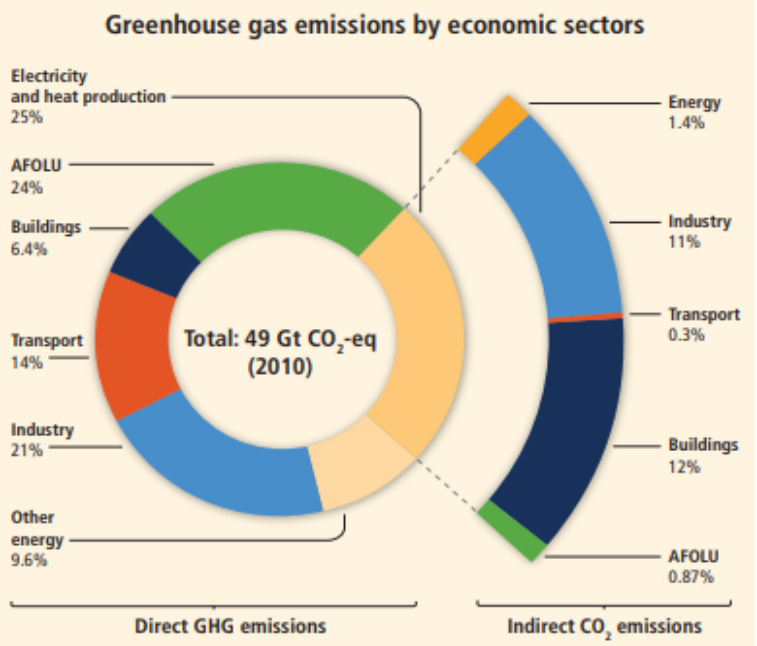


Figura 2: Emissione totale dei gas serra per diversi settori, 2010 – Fonte AR5 Synthesis Report - Climate Change 2014

Dall'ultimo report rilasciato da BP del 2020 [3], si evince come ci sia stata una crescita delle emissioni di anidride carbonica per usi energetici del 0.5% rispetto all'anno precedente (2018) ma minore della metà della crescita annua registrata negli ultimi 10 anni (1.1%). Tale dato risulta positivo per il futuro, anche se va ricordato che il 2018 fu l'anno con il maggior aumento percentuale delle emissioni di anidride carbonica, pari al 2.1%. Questo trend si registra anche nei dati dell'energia primaria globale, in quanto nel 2019 si è registrato un aumento di solo l'1.3% rispetto all'anno precedente. L'aumento dei consumi energetici è stato trainato da fonti rinnovabili e gas naturale, che insieme hanno contribuito per tre quarti, mentre il resto dei combustibili è cresciuto ad un ritmo più lento rispetto alle loro medie decennali, fatta eccezione per il nucleare. La Cina rappresenta la nazione con la maggior crescita energetica, rappresentando più del 75% della crescita globale netta e il maggior contribuente al mondo per la produzione di energia rinnovabile, pari al 23%, seguita dagli USA (20%) e dalla Germania (7.3%).

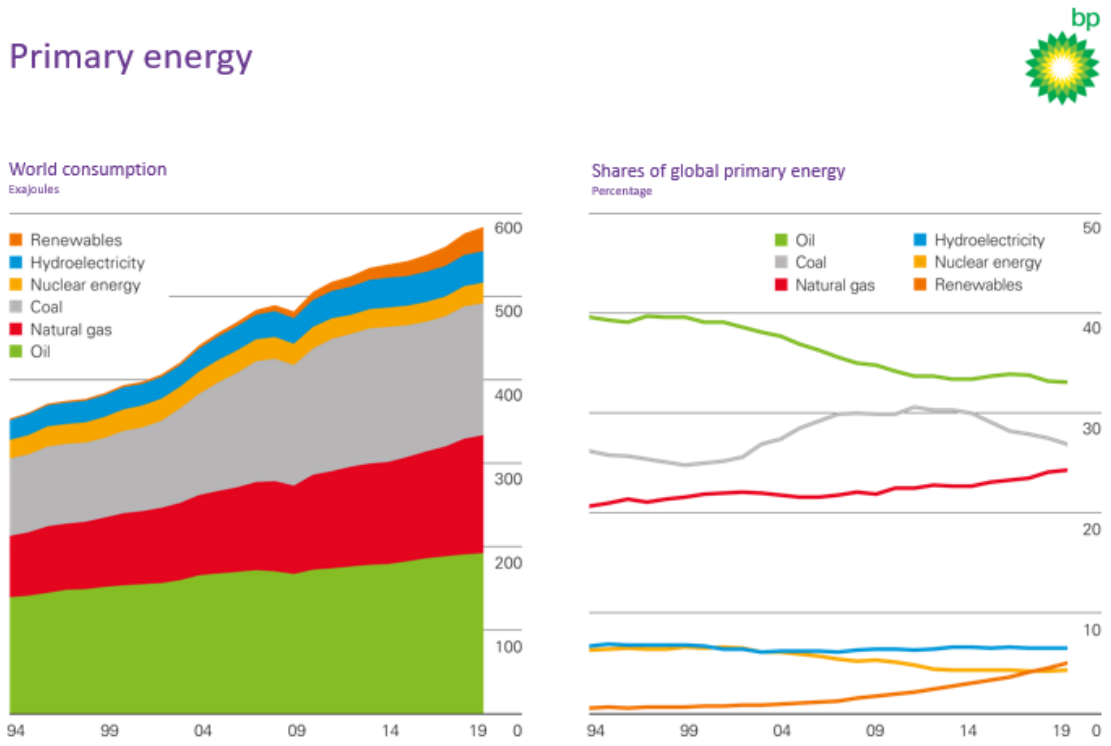


Figura 3: Energia primaria consumata - Fonte BP 2020

Dunque, da questa raccolta di dati fornita dal BP, si evince come il rallentamento della crescita della domanda di energia primaria, combinato con uno spostamento dal carbone, verso gas naturale e rinnovabili, abbia portato ad un significativo rallentamento nella crescita delle emissioni di anidride carbonica. Tuttavia, c'è ancora molto sviluppo da fare perché il carbone risulta essere, ad oggi, la principale forma di produzione dell'energia elettrica, valendo il 36% della potenza totale. Inoltre, le energie rinnovabili devono crescere ancora più fermamente nelle prossime tre decadi per arrivare ad ottenere una completa decarbonizzazione.

L'International Energy Agency (IEA), stima per il 2020 una riduzione di circa 2.6 Gt di CO_2 nel mondo rispetto all'anno precedente. Ciò è stato causato della comparsa della pandemia globale del Covid-19 che ha comportato misure di restrizione per gli spostamenti, riducendo così l'inquinamento ambientale su scala globale. Inoltre, si stima che le emissioni globali di CO_2 dovrebbero essere diminuite ancora più rapidamente nei restanti mesi dell'anno, raggiungendo le 30.6 Gt alla fine del 2020, quasi l'8% in meno rispetto al 2019. Tale riduzione sarebbe la più grande di sempre, sei volte superiore al precedente record di riduzione di 0.4 Gt nel 2009 a causa della crisi finanziaria [4]. Ciò è avvenuto a costi considerevoli e con la ripresa delle economie e il ritorno alla normalità vi è il rischio che tali guadagni vadano perduti. Ma per arrivare ad azzerare completamente le emissioni entro il 2050, il mondo richiede riduzioni simili delle emissioni di carbonio ogni due anni per i prossimi 25 anni. Tale risultato può essere

raggiunto solo da un cambiamento radicale in tutti i nostri comportamenti.

La ristrutturazione e la costruzione di nuovi edifici sempre più efficienti, con lo scopo di raggiungere il benchmark di edifici ZEB (*Zero Energy Building*), risulta essere di primaria importanza. Difatti i due temi precedentemente trattati, della sovra occupazione del suolo urbano e dell'alto consumo di energia da parte degli immobili, attribuiscono al settore edilizio un grande potenziale nella riduzione dei gas ad effetto serra. È in questa direzione che si stanno muovendo le normative e regolamentazioni di molti paesi, tra cui l'Europa che ha stabilito, dal 2021, la costruzione o ristrutturazione di edifici solo di tipo nZEB, ovvero edifici che si avvicinano a consumi quasi nulli. L'obiettivo che si è imposta l'Unione Europea con questa direttiva così restrittiva è di arrivare al 2050 con un parco immobiliare quasi de carbonizzato, sicché si ridurrebbe del 36% l'attuale consumo dell'energia attribuito al settore edilizio. Le tecnologie per ottenere risultati così rilevanti dal punto di vista energetico sono già ampiamente diffuse sul mercato, come le pompe di calore, i pannelli fotovoltaici o recuperatori di calore ad alta efficienza. Tali tecnologie necessitano pertanto di uno studio preliminare dettagliato, con analisi dinamiche sul comportamento edificio–impianto, per valutarne l'effettiva efficacia e potenzialità. Difatti si possono presentare casi in cui i benefici apportati dall'utilizzo di impianti di ultima generazione non risultino significativi e rilevanti a causa, per esempio, della posizione geografica o di un clima non favorevole.

La modellizzazione urbana ha avuto origine dalla simulazione dei singoli edifici, ma per rispondere a scopi differenti, come la crescente attenzione allo sviluppo sostenibile delle aree urbane. Tuttavia, risulta essere ancora poco utilizzata dagli enti comunali e statali per la pianificazione del territorio urbano. Sul mercato sono presenti diversi software di modellizzazione dinamica dettagliata, opensource o a pagamento, che consentono di fare analisi energetiche degli edifici, ne sono un esempio EnergyPlus e TRNSYS. Sono programmi che richiedono grandi quantità di dati di input e di archiviazione, poiché eseguono analisi termiche su sistemi complessi, come sono gli edifici, privilegiando il grado di dettaglio alla velocità di analisi. Così facendo risultano essere ottimi per determinare i consumi o la classe energetica degli edifici, ma risultano sconvenienti e inadatti per lo studio di sistemi che racchiudono decine o centinaia di immobili. La modellizzazione energetica consente di eseguire studi e simulazioni su differenti scenari, che rappresentano un importante strumento per la pianificazione del territorio. Nel caso della modellizzazione urbana per un distretto cittadino si ha un insieme complesso di più strutture e attività che dipendono l'uno dall'altro. Questo comporta un numero elevato di scambi termici che avvengono sia all'esterno che all'interno degli immobili, con la presenza di diverse condizioni al contorno che influenzano il fenomeno del microclima, come

la radiazione solare, la superficie stradale, il traffico e le aree verdi. Un ambiente di lavoro così trasversale comporta inevitabilmente l'analisi matematica per vie più semplificate. A tale scopo, i modelli dinamici semplificati consentono di gestire un numero elevato di edifici mantenendo un buon grado di dettaglio nei risultati. Tra questi, i modelli a Resistenza-Capacità definiscono gli edifici come un insieme di nodi collegati da resistenze e capacità termiche, di fatto rappresentando il sistema edifici-ambiente come una rete elettrica. Questo sistema così strutturato richiede solamente la determinazione dei parametri del modello e la risoluzione analitica del sistema.

Questo modello di programmazione semplificato è stato utilizzato per la valutazione energetica dei diversi edifici e dell'isola di calore. Il lavoro di questa tesi ha l'obiettivo di implementare un modello di simulazione, in grado di considerare l'effetto dell'isola di calore (Urban Heat Island, UHI) per un caso di studio reale della città di Padova. L'ambiente di simulazione utilizzato, per lo sviluppo del codice, è il linguaggio Python in quanto presenta maggiori opportunità nel numero di librerie disponibili per la programmazione scientifica e l'analisi dei dati.

All'inizio del documento viene fornita una spiegazione generale sulla definizione di modellizzazione urbana e sul programma EUReCA, già sviluppato in elaborati precedenti, poi viene descritto il programma *Urban Weather Generator (UWG)*, utilizzato come base di studio per la realizzazione del modello del UHI. Successivamente viene presentato un distretto del centro città di Padova, che rappresenta il caso studio per il quale vengono eseguite le simulazioni, col fine di valutare l'effettiva presenza dell'isola di calore. Dopodiché, nell'ultimo capitolo sono presentati i risultati ottenuti dal modello EUReCA e confrontati con il software *(UWG)*, per comprovarne la validità. Infine, negli ultimi paragrafi del capitolo, è analizzato l'effetto di alcuni parametri sull'entità del fenomeno dell'isola di calore e, attraverso l'analisi di uno scenario a lungo termine, come il riscaldamento globale contribuisca a risaltarne gli effetti.

CAPITOLO 1

1.1 LA MODELLIZZAZIONE URBANA

L'agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, firmata da tutti i 193 governi delle Nazioni Unite, comprende 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile (*Sustainable Development Goals, SDGs*). Tra questi, l'obiettivo 11, "Città e comunità sostenibili", sottolinea l'importanza che assumono le città e gli insediamenti per migliorare il tenore di vita e diminuire il consumo globale di energia. In particolare, gli edifici sono una delle principali fonti di consumo di energia e di materiali nelle aree urbane di tutto il mondo. In questo scenario, l'utilizzo dell'energia nelle città deve essere gestito in maniera più rigorosa e con l'ottimizzazione nella progettazione dei centri urbani [5].

I recenti regolamenti sottolineano l'importanza di ristrutturare gli edifici esistenti e di costruire i nuovi distretti, raggiungendo elevati standard energetici. Vi è quindi la necessità di strumenti di modellazione per valutare gli scenari energetici, con lo scopo di gestire e progettare le città al meglio. Nel corso degli anni sono state sviluppate numerose metodologie e strumenti e tra questi, gli strumenti di *Urban Building Energy Modelling* (UBEM) consentono la simulazione energetica di edifici su larga scala. Scegliere uno strumento UBEM appropriato, bilanciando il livello di complessità, accuratezza, usabilità ed esigenze di calcolo, rimane una sfida per gli utenti. Pertanto, sono state sviluppate numerose metodologie e strumenti di modellazione dell'energia per l'edilizia urbana con diverse funzionalità, come rappresentato nella figura sottostante.

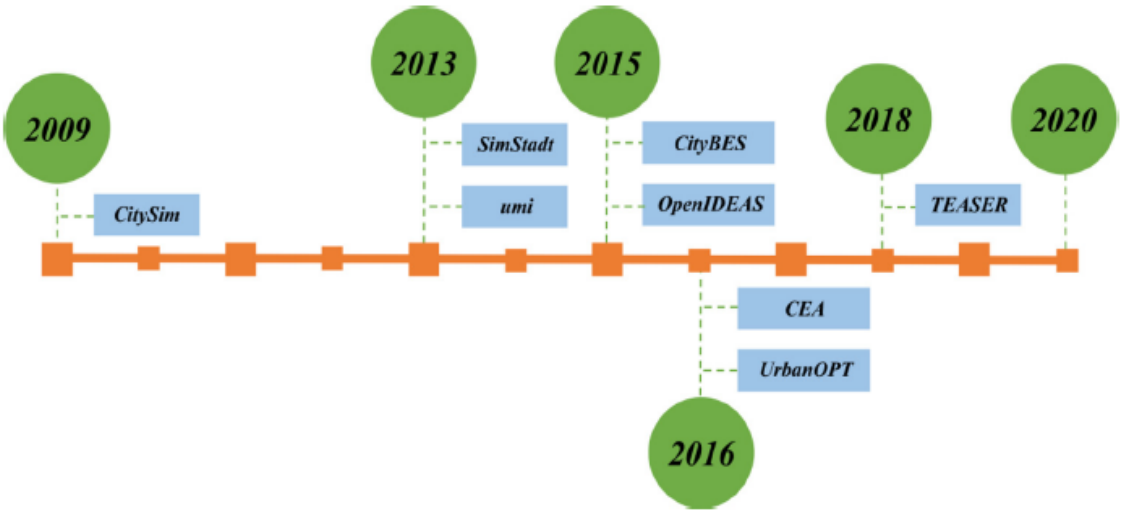


Figura 4: Sviluppo temporale dei diversi programmi per UBEM - Fonte Ferrando et al. 2020

Essi consentono agli utenti di calcolare il fabbisogno energetico dell'edificio, valutare diversi scenari, stimare i carichi di picco e tanto altro. La modellizzazione UBEM si distingue dagli altri due approcci utilizzati per modellare l'ambiente urbano, quali l'analisi dell'uso del territorio o dei trasporti (uno strumento di riferimento è *UrbanSim*) e la modellazione dell'energia del sistema urbano USEM [6]. USEM è specificamente focalizzata sull'ottimizzazione e la progettazione di reti e sistemi energetici, modellando il parco edilizio senza un alto livello di dettaglio. Al contrario, l'obiettivo di UBEM è principalmente la modellazione del materiale edilizio e della fisica degli edifici, ai fini di un'analisi dettagliata dell'ambiente urbano. Questi approcci sono complementari e possono essere accoppiati in analisi che comprendano la modellizzazione sia delle utenze sia della generazione e distribuzione dell'energia. La seguente figura rappresenta uno schema generale dei diversi approcci di modellizzazione urbana presenti sul mercato.

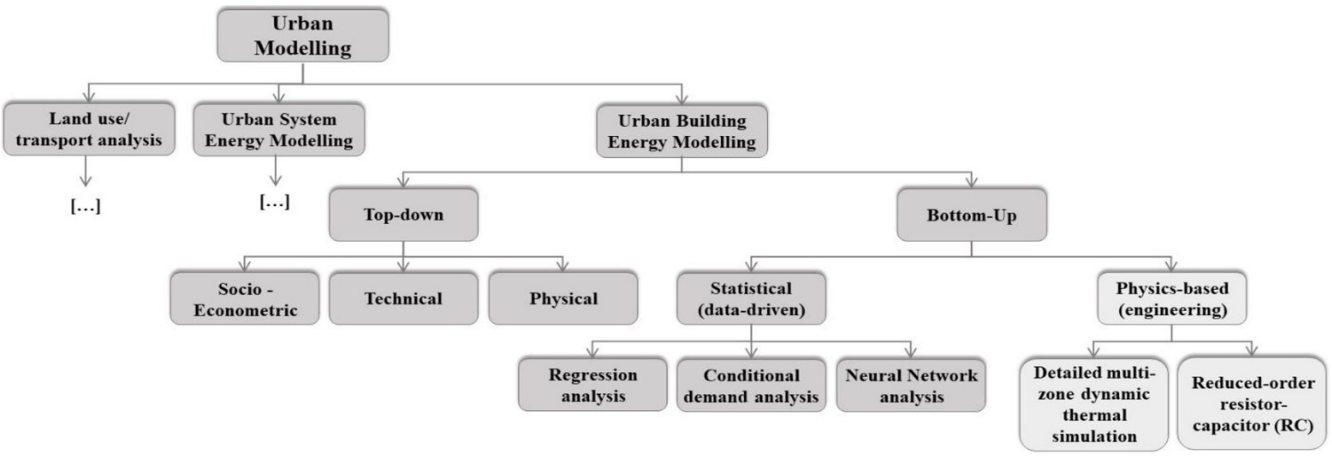


Figura 5: Rappresentazione schematica dei diversi strumenti per la modellizzazione urbana – Fonte Ferrando et al. 2020

Lo scopo principale di questi strumenti e modelli è dunque di gestire e prevedere i consumi energetici su scala urbana, tenendo in considerazione le interazioni tra più immobili. Questo obiettivo principale può essere accompagnato a sua volta, anche dalla valutazione della qualità ambientale interna ed esterna ad un edificio e dalla validità tecnico-economica della realizzazione di un impianto a energia rinnovabile.

Gli approcci UBEM sono solitamente divisi in due categorie principali: *Top-down* e *Bottom-Up* [7]. I modelli *Top-down* non necessitano di dati specifici relativi ad ogni singolo edificio e possono stimare il consumo energetico degli edifici da serie storiche e da altri fattori. L'origine di questi fattori divide tale modello in tre principali sottocategorie: modelli socio-econometrici, tecnici e fisici [8]. In questi modelli sono necessari meno dati di input e possono essere inclusi aspetti socioeconomici a lungo termine. Tuttavia, non possono intrinsecamente prevedere le

tendenze future perché sono basate su interconnessioni passate e nella maggioranza dei casi forniscono solo dati aggregati come risultati, senza alcun dettaglio spaziale o temporale. Così che vengono principalmente impiegati per il grande pregio di facile reperibilità dei dati di input. Al contrario, l'approccio ascendente (*Bottom-Up*) si basa sul calcolo del fabbisogno energetico di ogni singolo edificio, che è successivamente aggregato all'interno di un insieme immobiliare. Sulla base di come vengono calcolati i consumi energetici, vengono individuati due diversi approcci. I modelli statistici, detti anche *data-driven*, che fanno uso di dati sperimentali per valutare il consumo energetico degli edifici e i modelli basati sulle simulazioni, *engineering o physical*, che calcolano il fabbisogno energetico degli edifici attraverso una caratterizzazione termica dettagliata [9]. Anche se questi modelli hanno bisogno di una vasta quantità di dati per caratterizzare ciascun edificio, non richiedono un eccessivo sforzo computazionale poiché utilizzano un valore ridotto di archetipi. Sono quindi abbastanza versatili per identificare il mix strategico di politiche e misure di ristrutturazione per grandi blocchi edilizi. Inoltre, le altre tipologie di modelli prevedono il consumo annuo di energia senza un adeguato dettaglio spazio-temporale [10]. Quindi l'obiettivo dell'UBEM, basato sul metodo *Bottom-Up*, è quello di progettare e ottimizzare i sistemi energetici urbani e di pianificare lo sviluppo urbano, perciò i loro risultati sono caratterizzati da un maggiore dettaglio spazio-temporale rispetto ad altri modelli. Tali configurazioni possono essere ulteriormente suddivise rispetto al metodo di simulazione in modelli dinamici dettagliati e modelli dinamici semplificati a parametri concentrati *(RC)*. I primi modelli utilizzano equazioni dinamiche dettagliate del bilancio termico di superfici, zone e sistemi energetici; mentre i secondi utilizzano modelli semplificati basati sull'analogia elettrica in cui, di solito, ogni edificio è rappresentato da un'unica zona termica.

Quest'ultima tipologia di modelli è stata utilizzata per le simulazioni di questa tesi, poiché consente di eseguire calcoli computazionali in maniera rapida, pur gestendo grandi moli di dati. Il software utilizzato per le analisi di questo elaborato è *EUReCA*, il cui funzionamento verrà sinteticamente spiegato ed evidenziato nei capitoli successivi.

Ognuno di questi programmi, pur appartenendo a categorie differenti, presenta un flusso di lavoro piuttosto simile (la *fig. 6* ne mostra un esempio). Il flusso di lavoro rappresenta il processo di modellazione, dagli input agli output ed è quindi suddiviso nelle seguenti cinque fasi:

- Input
- Modello
- Simulazione

- Output
- Post-processing

La fase di input è ripartita in quattro categorie rappresentate dai dati meteorologici, dagli edifici (che includono i dati geometrici e le caratteristiche dei materiali, organizzati all'interno di archetipi) e dalle schedules che riguardano i carichi interni degli immobili. In particolare, i dati relativi alla costruzione e alla geometria possono essere introdotti tramite dati georeferenziati in 2D, attraverso lo standard Geojson, o in 3D, utilizzando il formato Cityjson. Terminata la prima fase di settaggio dei valori si passa alla seconda fase, in cui si crea il modello. Esso rappresenta l'elaborazione dei valori geometrici e termofisici degli edifici e del distretto. Successivamente nella terza fase, il modello dell'immobile e dell'area distrettuale vengono combinati con i dati meteorologici per la simulazione. Nella fase successiva vengono generati gli output della simulazione, i quali comprendono i fabbisogni energetici, le temperature, i consumi di energia ed altri dati, per ciascun edificio dell'area analizzata. Infine, la fase successiva è il post-processing che riguarda l'elaborazione dei risultati ottenuti, per evidenziare il comportamento delle variabili desiderate tramite la visualizzazione di fogli di calcolo o grafici.

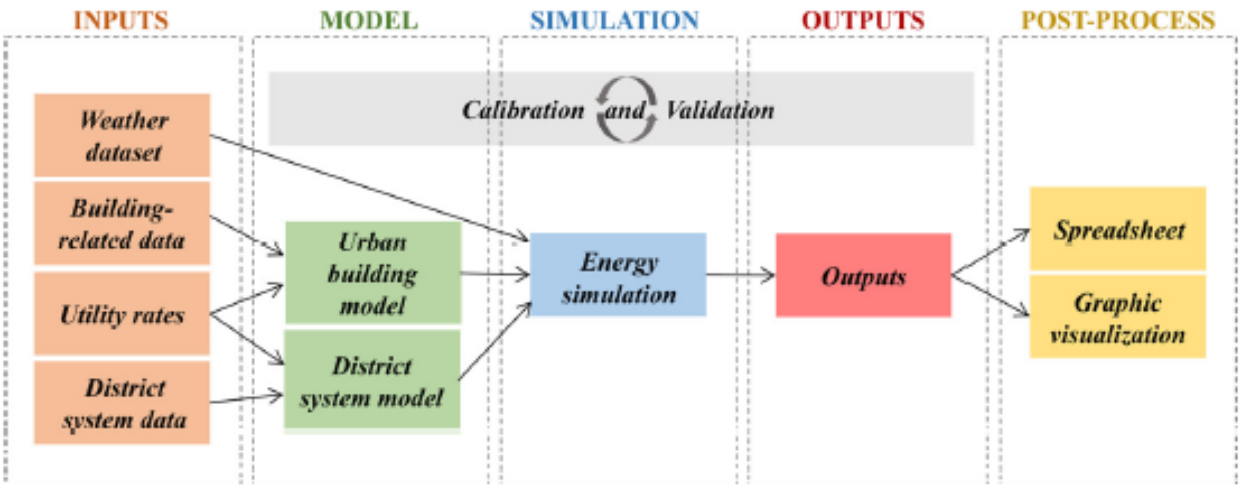


Figura 6: Workflow generale usato nei modelli UBEM

1.2 L'ISOLA DI CALORE URBANA

La rapida crescita della popolazione mondiale comporta una grande richiesta di alloggi soprattutto nei centri cittadini. Con le nuove costruzioni e idee di design nella realizzazione di condomini o interni complessi immobiliari, la topologia della città cambia radicalmente, causando un effetto a cascata sui microclimi delle zone urbane. Oltre a questo effetto si aggiungono le proiezioni dei cambiamenti climatici che mostrano un aumento della frequenza e della gravità degli eventi meteorologici estremi, come le ondate di calore [11]. Per questi motivi, il rapporto tra l'uso del territorio e il clima urbano ha attirato sempre più l'attenzione degli urbanisti e dei responsabili politici con lo scopo di attuare strategie di crescita, che mirano a migliorare il benessere delle città. Gli edifici, essendo i maggiori consumatori energetici delle città, hanno un ruolo primario nelle analisi energetiche delle città e assumono un ruolo ancora più rilevante nel caso di costruzione in luoghi densamente abitati, come le aree cittadine. Ciò è dovuto semplicemente al maggior numero di scambi termici che un immobile ha in città rispetto ad un edificio che si trova in aperta campagna, dovuto alla maggior densità di superfici e pareti che assorbono molta energia, riflettendone assai poca. In questo contesto si forma l'isola di calore, altresì conosciuta come *Urban Heat Island* (UHI). L'effetto dell'isola di calore si manifesta quando l'ambiente urbano risulta essere più caldo dello spazio rurale. Quindi l'UHI si riferisce all'effetto causato dall'ambiente edilizio sulla temperatura e umidità dell'ambiente urbano. Luke Howard, verso la fine del 1800, è stato il primo climatologo ad ipotizzare che il clima delle città fosse dipendente dalle iterazioni con le aree circostanti in base alla natura degli scambi termici. Successivamente fu spiegato in maniera dettagliata, verso la fine del XX secolo, da Oke secondo il quale l'effetto dell'UHI può esser considerato tramite un bilancio energetico basato sull'analisi del flusso energetico in entrata e in uscita da un sistema.

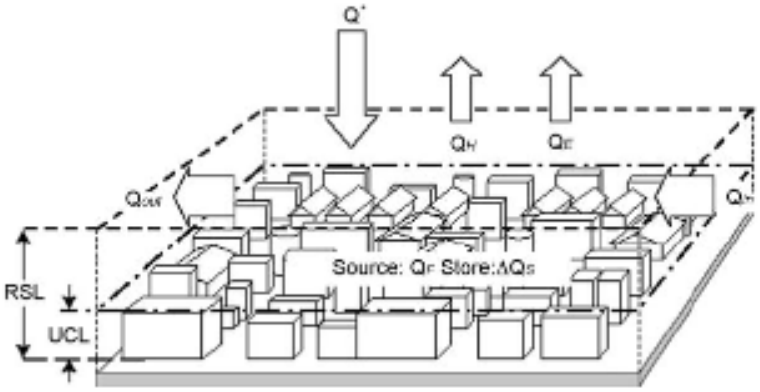


Figura 7: Schema dei flussi di energia nel bilancio energetico per l'UHI - Fonte Oke

L'energia assorbita da questo sistema è composta dalla radiazione solare e dall'attività antropica. Tale valore risulta essere bilanciato dal riscaldamento dell'aria sopra la superficie, per convezione e radiazione, dall'evaporazione dell'umidità e dallo stoccaggio di calore nei materiali delle superfici [12].

Il fenomeno dell'isola di calore ha un effetto diretto sulle temperature, le quali sono normalmente più basse in città rispetto alle zone rurali durante il giorno e più elevate durante la notte [13]. Questa differenza termica ha origine per tre motivi:

- la presenza di materiali impermeabili che intrappolano la radiazione solare (onde corte) durante il giorno e la trasmettono di notte (scambio radiativo con la volta celeste nell'infrarosso);
- la presenza di edifici di diverse altezze e dimensioni che generano ombre e coperture urbane;
- la generazione antropica di calore direttamente in strada o all'interno degli edifici.

L'ultima causa, in alcune situazioni, può essere considerata come la forza motrice dell'intero fenomeno, generando alte temperature anche durante il giorno, dovute alla presenza del traffico automobilistico e degli impianti di condizionamento [14]. La valutazione di queste ultime due variabili, in alcuni casi studio, risulta essere difficile per mancanza di dati, sicché si preferisce assumere dei valori costanti per le simulazioni energetiche. In questo elaborato saranno comunque utilizzati degli algoritmi per valutare, sia l'energia termica rilasciata dal traffico cittadino sia dai sistemi HVAC, che saranno spiegati nei capitoli successivi.

Gli effetti diretti della presenza dell'UHI nelle aree cittadine si manifestano con un aumento diretto della temperatura ambiente e con un conseguente aumento di energia elettrica richiesta per il condizionamento. Uno studio mostra come a Barcellona (Spagna) l'impatto dell'isola di calore comporti un aumento della temperatura ambiente di 2.8°C in inverno e 1.7°C in estate, raggiungendo picchi di 4.3°C a livello del suolo. Inoltre, in questa città con alta densità di edifici si ha un conseguente incremento della potenza elettrica richiesta tra il 18% e 28%, a seconda dell'intensità dell'UHI e della quantità di radiazione solare [15]. Questi risultati si rispecchiano anche nel caso studio della città di Roma (Italia) per cui d'inverno si raggiungono differenze di temperatura rispetto alle zone rurali di 2°C, con picchi di 5°C nella stagione estiva durante le ore notturne [16].

L'isola di calore comporta dunque un aumento di energia elettrica richiesta dalla rete nel periodo estivo, il periodo dell'anno in cui la rete risulta maggiormente stressata, comportando possibili disguidi di fornitura del servizio, come i blackout.

Una soluzione per ridurre l'innalzamento della temperatura nei centri abitati è sicuramente incrementare l'estensione delle zone verdi come parchi e giardini. Grazie a questa possibilità l'energia viene trasferita dalla superficie urbana all'atmosfera attraverso l'evaporazione dell'acqua, collegando così il bilancio energetico urbano al ciclo idrologico. Per esempio, uno studio recente a Glasgow (Scozia), in cui si ha clima fortemente marittimo, ha stimato che un aumento del 20% di zone verdi sopra il livello attuale, potrebbe ridurre di un terzo l'effetto dell'UHI nel 2050 [17]. Lo spazio verde è di conseguenza un capitale ambientale che deve essere utilizzato per mitigare gli effetti negativi delle UHI, gli eventi di caldo estremo e il cambiamento climatico.

1.2.1 METODOLOGIE PER LA VALUTAZIONE DELL'URBAN HEAT ISLAND

Negli ultimi 30 anni sono stati sviluppati molti tipi di software per la simulazione dinamica degli edifici (Building Energy Simulation, BES) come EnergyPlus e TRNSYS, il cui obiettivo è la stima della domanda di riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Per il calcolo delle richieste termiche, gli strumenti BES hanno bisogno di un file meteorologico rappresentativo del sito da analizzare. Dal documento si ricavano i parametri climatici che variano ora per ora, quali temperatura, umidità, radiazione solare, direzione e velocità del vento. Questi file sono normalmente ottenuti da stazioni meteorologiche situate in aree periferiche o rurali. Tali dati meteorologici rurali utilizzati nel calcolo della domanda termica di edifici urbani, alterano i risultati finali ottenuti dagli strumenti BES, aggiungendo livelli di incertezza. Per questo motivo, è stata condotta una quantità crescente di ricerca per stimare meglio le condizioni meteorologiche necessarie per l'esecuzione della simulazione. Uno strumento che potrebbe essere utilizzato in questo senso è, ad esempio, *Envi-Met* [18]. Tuttavia, tale approccio ha forti limiti come il numero di parametri e la precisione necessaria per questi simulatori atmosferici. Inoltre, risulta essere molto elevata anche la loro complessità e il conseguente tempo di simulazione.

Recentemente sono stati compiuti alcuni sforzi per generare dati meteorologici urbani pronti per essere utilizzati nella simulazione delle prestazioni degli edifici, tenendo conto di condizioni climatiche urbane più rappresentative a livello di distretto o di città. Uno dei risultati è lo strumento *Urban Weather Generator* [19], un tipo di software con un modello atmosferico. L'input del UWG è un file climatico rurale e l'output è un file meteo urbano modificato, di facile utilizzo all'interno dei programmi BES. Per generare questo file climatico modificato, l'UWG

ha bisogno di una definizione dell'area urbana in funzione di alcuni parametri geometrici e termici, che verranno dettagliatamente spiegati nel capitolo successivo.

Per iniziare l'analisi, è di primaria importanza specificare che il fenomeno dell'isola di calore avviene all'interno di un volume d'aria a sua volta suddiviso in due zone adiacenti. Tale volume, definito *Planetary boundary layer* (PBL), è suddiviso nell'*Urban boundary layer* (UBL) e nel *Urban canopy layer* (UCL). Lo strato UBL a livello di mesoscala (nei modelli meteorologici rappresenta lo sviluppo orizzontale da una decina fino a un centinaio di chilometri), si trova al di sopra del UCL e le sue proprietà sono influenzate dalla presenza di un'area urbana al di sotto del suo limite inferiore. L'UCL al contrario è un concetto di microscala, che descrive la parte dell'atmosfera tra la superficie e le cime degli edifici e alberi. Il clima locale di quest'ultima è dominato dai materiali e dalla geometria dell'ambiente urbano, tipicamente conosciuta come rugosità urbana, ed è la zona solitamente occupata dalle persone. Di conseguenza, l'UCL rappresenta la parte dell'atmosfera vitale per garantire comfort, salute e benessere nelle città.

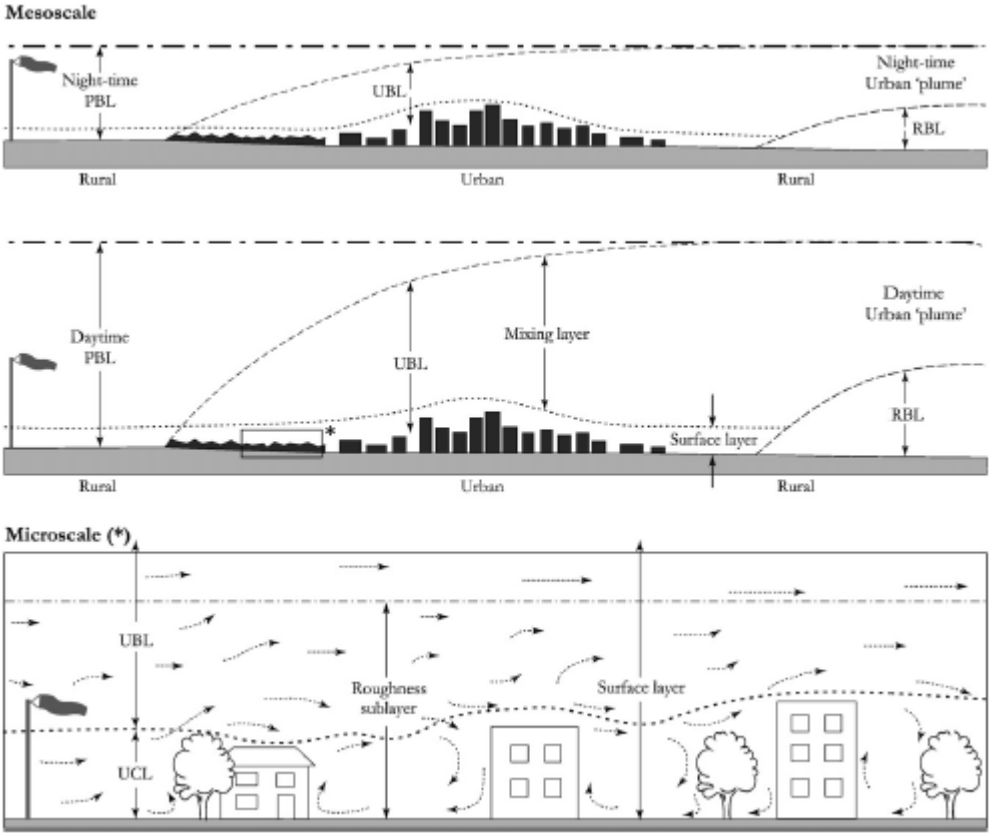


Figura 8: Struttura degli strati al di sopra della città - Fonte Oke

La formazione dell'isola di calore dipende da diversi processi climatici e può esser descritta in termini di fenomeni che accadono nell'uno o nell'altro strato. Di giorno difatti l'UBL risulta

avere una estensione verticale maggiore rispetto alla notte, poiché le temperature abbassandosi aumentano la densità dell'aria e quindi a parità di massa d'aria, il volume si riduce.

Quindi, l'isola di calore è strettamente dipendente dalle condizioni meteorologiche, ma all'interno del UCL agiscono tutte le attività umane della città che provocano emissioni antropogeniche. Tali hanno il potenziale di aumentare la quantità di energia termica rilasciata nell'area urbana, mentre le caratteristiche meteorologiche e geografiche variano l'intensità e la distribuzione di questo rilascio.

CAPITOLO 2

2.1 IL MODELLLO DI SIMULAZIONE DELL'URBAN HEAT ISLAND

Nella scrittura del codice per determinare la UHI (Urban Heat Island) è stato seguito come base il programma *Urban Weather Generator* di B. Bueno [20].

Il modello calcola i valori orari della temperatura del canyon cittadino, ricevendo come dati di input i valori meteorologici misurati alla stazione meteo, localizzata all'esterno della città. Nel caso di questo elaborato i valori di input per il modello sono stati forniti dall' Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV). Il modello è composto da quattro differenti moduli accoppiati (*fig. 9*):

1. Modello per la zona rurale (RSM)
2. Modello per la distribuzione verticale della temperatura dell'aria rurale (VDM)
3. Modello per lo strato atmosferico posto sopra il canyon cittadino (UBL)
4. Modello per il canyon cittadino (UC)

Dal primo modello si calcola il calore sensibile rurale (H_{rur}) [W/m^2], ovvero la radiazione assorbita al suolo e scambiata per convezione con l'aria, con verso positivo uscente dal nodo della temperatura rurale (T_{rur}) [K], che verrà successivamente utilizzata nel bilancio termico del terzo modello. Il secondo modello permette di determinare lo sviluppo spaziale in altezza della temperatura sopra il sito rurale (T_{VDM}) [K]. Il terzo modello calcola la temperatura dell'aria al di sopra del canyon cittadino (T_{ubl}) [K] eseguendo un bilancio termico tra il calore sensibile rurale e urbano (H_{urb}) [W/m^2]. Infine, l'ultimo modello determina la temperatura del canyon (T_{urb}) [K] e il calore sensibile urbano (H_{urb}) che sarà impiegato per il bilancio termico del modello UBL.

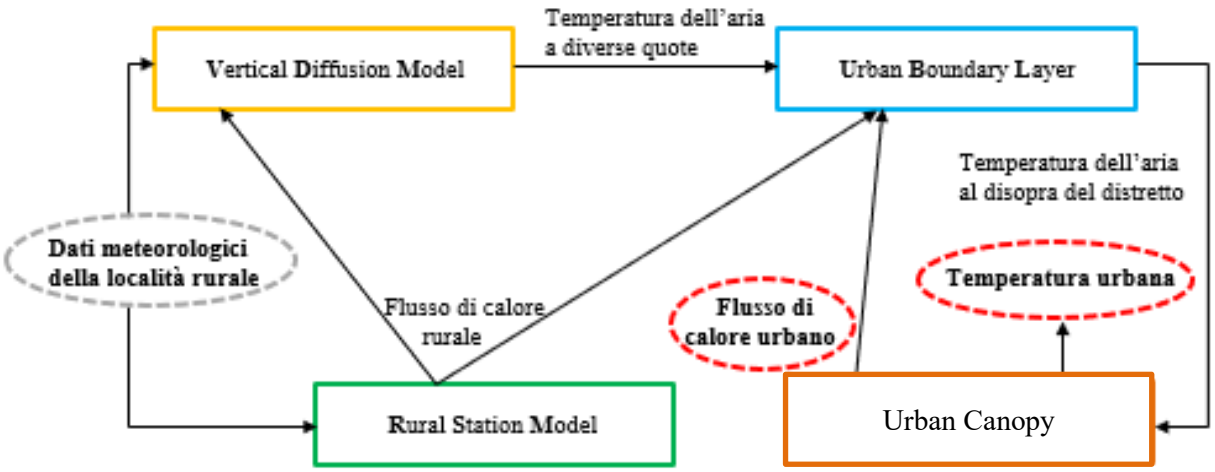


Figura 9: Informazioni scambiate tra i diversi moduli del UWG

2.1.1 MODELLO DELLA ZONA RURALE (RSM)

Il modello RSM riceve i valori orari dei dati climatici di un determinato sito per calcolare il flusso di calore che sarà successivamente fornito al modello UBL.

Per determinare la potenza sensibile, si esegue un bilancio termico sulla superficie del suolo, tramite le equazioni che rappresentano l'accumulo e lo scambio del calore dal terreno. Per far ciò i primi metri di terreno vengono modellizzati attraverso diversi strati, ognuno dei quali viene rappresentato con una capacità termica C. Lo scambio tra essi viene invece calcolato attraverso dei coefficienti di scambio conduttivo. Le equazioni sono le seguenti:

$$d_1(\rho \cdot c)_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = k_{1,2}(T_2 - T_1) + Q_{rad} + h_{conv}T_{rur} + h_{rad_{sky}}T_{sky} \quad (1)$$

per il primo layer,

$$d_1(\rho \cdot c)_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = k_{i,i+1}(T_{i+1} - T_i) + k_{i,i-1}(T_{i-1} - T_i) \quad (2)$$

per tutti i layer intermedi ed infine

$$d_{n-1} \cdot (\rho \cdot c)_{n-1} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial \tau} = k_{n-1,n}\left(T_{deep} - T_{n-1}\right) \quad (3)$$

per l'ultimo strato. Nelle seguenti equazioni d_i, T_i e $(\rho c)_i$ sono rispettivamente la profondità dello strato [m], la temperatura media dello strato [K] e la capacità termica del materiale i-esimo [J/(m^3 K)]; $k_{i,i+1}$ è la conduttanza termica media tra due strati del layer [W/(m^2 K)]; Q_{rad} è la radiazione globale incidente sul suolo ad ogni ora [W/m^2]; T_{deep} [K] è la temperatura annuale media dell'aria del sito, che viene utilizzata come condizione al contorno del terreno, e $\partial\tau$ è il time step considerato nella simulazione, in questo caso pari a 3600 secondi. T_{rur} e T_{sky} sono la temperatura rurale oraria del sito e la temperatura della volta celeste [K] e $h_{rad_{sky}}$ è il coefficiente di scambio radiativo con la volta celeste [W/(m^2 K)]. Infine, h_{conv} è il coefficiente di scambio termico convettivo tra l'aria e il suolo ed è stato calcolato secondo la correlazione di Palyvos [W/(m^2 K)]:

$$h_{conv} = 5.8 + 3.7 \cdot u_{atm} \quad (4)$$

Infine, dopo aver determinato la temperatura del suolo T_1 si può calcolare il calore sensibile rurale ad ogni istante di tempo [W/m^2] come:

$$H_{rur} = h_{conv} \cdot (T_{rur} - T_1) \tag{5}$$

2.1.2 MODELLO DELLA DISTRIBUZIONE VERTICALE DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA (VDM)

Il modello della distribuzione in altezza della temperatura del suolo, si basa sulla lettura dei valori di temperatura e velocità dell'aria ottenuti dal file climatico per calcolare il profilo verticale della temperatura dell'aria sopra la zona di misurazione dei dati. Tali risultati sono poi trasferiti al terzo modello dell'UBL, per poter definire gli scambi termici che avvengono con il canyon cittadino.

Il profilo verticale raggiunge complessivamente i 150 m di altezza z_{ref}, in quanto è l'altezza per cui il valore della temperatura è uniforme ($\frac{\partial T}{\partial z} = 0$), tale dato della temperatura viene fornito al terzo modello per il calcolo della temperatura al di sopra del canyon.

Per il calcolo della temperatura oraria a diverse quote di altitudine si sono seguite le correlazioni suggerite da Bueno.

Il VDM risolve la seguente equazione di diffusione del calore:

$$\frac{\partial T_{VDM}(z)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot K_d(z) \cdot \frac{\partial T_{VDM}(z)}{\partial z}) \tag{6}$$

dove z è l'altitudine [m]; ρ è la densità dell'aria, ipotizzata pari a 1.225 kg/m^3; K_d è il coefficiente di diffusione [m^2/s]. T_{VDM} è la temperatura potenziale dell'aria [K], la quale rappresenta la temperatura che una particella ad una certa pressione dovrebbe acquisire, per esser portata adiabaticamente alla pressione di riferimento.

Il limite inferiore dell'equazione (6) è la temperatura misurata alla stazione meteorologica, solitamente ad una altezza di $z = 2\ m$, mentre il limite superiore è definito da z_{ref}. Il valore del coefficiente di diffusione è definito dalla seguente equazione:

$$K_D = C_k \cdot l_k \cdot E^{1/2} \tag{7}$$

dove E è l'energia cinetica del moto turbolento del flusso [m²/s²]; C_k è un parametro del modello posto uguale a 0.4 e l_k è la lunghezza della scala. Il valore di E è calcolato come:

$$E = \max(w_s^2, E_{min}) \tag{8}$$

dove w_s è la velocità di miscelazione ed E_{min} è posto pari a 0.01. Per ulteriori approfondimenti sul Vertical Diffusion Model vedere "The urban weather generator", Bueno [20].

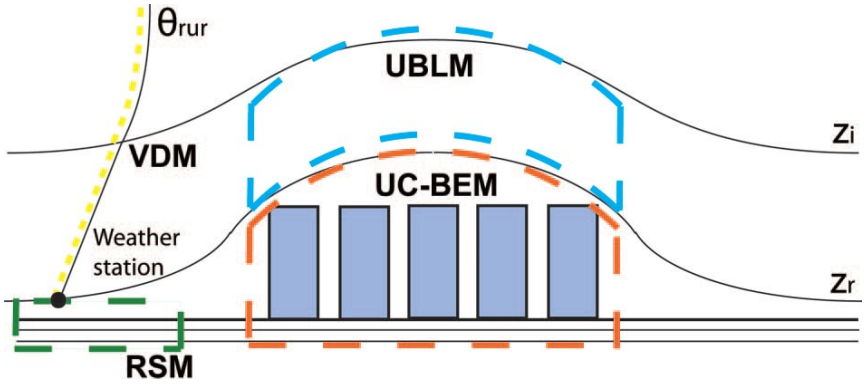


Figura 10: Rappresentazione della città e dei confini fisici dei diversi modelli - Fonte Bueno 2012, cit. 20

2.1.3 MODELLO DELLO STRATO ATMOSFERICO SOPRA IL CANYON CITTADINO (UBL)

Il modello UBL calcola la temperatura dell'aria sopra il canyon cittadino, partendo dalle temperature a differenti altezze ottenute dal VDM e dal calore sensibile rurale e urbano del RSM e del UC. Lo sviluppo del metodo si basa sul bilancio termico eseguito su un volume di controllo delimitato dall'altezza di miscelazione z_r e dal limite superiore z_i.

Il valore della quota z_r, alla quale l'influenza degli ostacoli verticali sui profili verticali e sui flussi crea un effetto di miscelazione, è stata assunta pari a 2 m, anche confrontando tale valore di input con i documenti presenti in letteratura; mentre il valore z_i è dipendente dall'ora del giorno, ovvero se è giorno viene assunta pari a 1000 m, mentre di notte è impostata a 50 m. Tali valori giocano un ruolo determinante per il calcolo della temperatura equivalente T_{eq} in quanto dipende dalla natura del fenomeno dell'advezione che è comandato o dal vento geostrofico (problema forzato) o dalla brezza di miscelazione urbana (problema di galleggiamento).

Durante il giorno il valore dell'altezza del volume di controllo è scelto e la temperatura di

riferimento è presa considerando i risultati ottenuti dal VDM ad un'altezza pari a z_{ref}, nella quale il profilo verticale è considerato uniforme.

In presenza del vento geostrofico, la velocità di riferimento per lo scambio termico è la velocità dell'aria misurata alla stazione meteorologica u_{atm} e l'area di scambio include la lunghezza della città ortogonale alla direzione del vento W. Invece se dominasse un fenomeno di miscelazione legato soprattutto ad un forte gradiente termico tra il canyon e il layer situato sopra il canyon, allora si avrebbe la presenza della velocità di circolazione u_{circ}, la quale si può calcolare tramite l'equazione 9:

$$u_{circ} = k_W \left(\beta \cdot z_i \cdot \frac{H_{urb} - H_{rur}}{\rho * c_p}\right)^{1/3} \tag{9}$$

dove k_W è una costante ($k_W = 1$), β è il coefficiente di galleggiamento ($\beta = g/\vartheta$), H_{urb} e H_{rur} sono i flussi termici sensibili dal sito urbano e rurale. Nel caso in cui la velocita di circolazione u_{circ} risulti maggiore della velocità del vento allora nell'equazione di bilancio energetico l'area laterale include il perimetro della città $P_{città}$.

Durante la notte con la presenza della brezza urbana, l'equazione 9 è comunque utilizzata per il bilancio termico, sebbene questa velocità sia inizialmente sviluppata per la situazione diurna.

Infine, l'equazione del bilancio termico utilizzata in questo modello risulta essere la seguente:

$$T_{UBL}(\tau) - T_{UBL}(\tau - 1) = C_{surf} + C_{adv} T_{eq} - C_{adv} T_{UBL}(\tau) \tag{10}$$

dove $C_{surf}, C_{adv}\ e\ T_{eq}$ sono dei coefficienti calcolati per ciascuno scenario e riportatati nella tabella sottostante (*tab. 1*), δ è il time step della simulazione [s], T_{VDM} sono le temperature all'esterno della città a diverse altezze (z_r, z_i e z_{ref}) e infine, si hanno i valori geometrici della città quali il: perimetro $P_{città}$ [m], l'area della città $A_{città}$ [m^2] e la discretizzazione orizzontale per lo scenario forzato $dx = D/4$, dove D è il diametro della città [m] .

Tabella 1: Coefficiente di superficie, di advezione e temperatura equivalente usati per ciascun scenario – Fonte Bueno 2012 [20]

Situazione	C_{surf}	C_{adv}	T_{eq}
		Notte	
Forzato	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{u_{atm}(z_m) \cdot z_i \cdot \delta \cdot c_p}{2z_m \cdot dx \cdot c_v}$	$\frac{2}{3}T_{VDM}(z_i) + \frac{1}{3}T_{VDM}(z_r)$
Galleggiamento	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{P_{città} \cdot u_{circ} \cdot \delta \cdot c_p}{A_{città} \cdot c_v}$	$\frac{1}{2}T_{VDM}(z_i) + \frac{1}{2}T_{VDM}(z_r)$
		Giorno	
Forzato	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{W \cdot u_{atm}(z_m) \cdot \delta \cdot c_p}{A_{città} \cdot c_v}$	$T_{VDM}(z_{ref})$
Galleggiamento	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{P_{città} \cdot u_{circ} \cdot \delta \cdot c_p}{A_{città} \cdot c_v}$	$T_{VDM}(z_{ref})$

Dalla risoluzione dell'equazione 10 si ottiene il valore della temperatura del volume di aria situato sopra il canyon T_{UBL}, la quale, per semplificazione, viene assunta uniforme all'interno del volume di controllo. Una seconda assunzione presente nel seguente modello riguarda il caso in cui la differenza tra i flussi di calore sensibili urbano e rurale sia minore o uguale a zero e in questo caso il valore della velocità di circolazione viene posto pari a zero, $u_{circ} = 0$.

2.1.4 MODELLO DEL CANYON CITTADINO (UC)

L'ultimo modello riguarda il canyon, poiché calcola la temperatura all'interno della città T_{urb}[K] e il flusso termico sensibile urbano H_{urb}[W/m^2] per valutare l'effettiva presenza di un'isola di calore nella città. Tali valori vengono calcolati partendo dalle misure della radiazione e velocità dell'aria misurate all'esterno della città e dalla temperatura dell'aria al di sopra della zona urbana calcolata con il terzo modello.

Come per i precedenti modelli, anche per il modello UC si esegue un bilancio termico considerando i differenti e numerosi fattori che entrano in gioco per il calcolo dell'effettiva temperatura del canyon, ovvero:

- il flusso termico scambiato tra le pareti e le finestre degli edifici, ipotizzate avere la stessa temperatura della superficie esterna rivolta verso il centro cittadino;
- il flusso termico scambiato con la superficie stradale;
- lo scambio termico sensibile tra la superficie stradale e l'atmosfera per radiazione con la

volta celeste;

- il flusso termico dovuto all'uscita di aria dagli edifici verso il canyon esterno;
- lo scambio termico con lo strato d'aria presente sopra la zona urbana;
- il calore sensibile rilasciato dai condensatori dei condizionatori;
- il traffico urbano legato ai diversi veicoli presenti nell'area urbana.

Nel modello UC si assume che l'aria all'interno della sfera urbana sia ben miscelata, sicché sia possibile calcolare un valore univoco di T_{urb} per la zona analizzata.

L'equazione del bilancio termico [W] che racchiude tutti i diversi contributi è la seguente:

$$V_{canyon}\rho c_v \frac{dT_{urb}}{d\tau} = A_w h_w (T_w - T_{urb}) + A_r h_r (T_r - T_{urb}) + A_r h_{rad,sky} (T_{sky} - \\ - T_{urb}) + A_{win} U_{win} (T_{in} - T_{urb}) + \dot{V}_{inf} \rho c_p (\dot{T_{in}} - T_{urb}) + A_{canyon} u_{ex} \rho c_p (T_{UBL} - T_{urb}) + \\ + H_{waste} + H_{traffic} \quad (11)$$

dove T_w, T_{in}, T_r sono rispettivamente la temperatura esterna dei muri, interna degli edifici e del suolo stradale [K]; U_{win} che rappresenta la trasmittanza media delle superfici vetrate [W/(m^2 K)]; A_w, A_r, A_{win} e A_{canyon} sono rispettivamente l'area delle pareti esterne, della superficie stradale, delle finestre e del canyon cittadino [m^2], quest'ultima è calcolata come:

$$A_{canyon} = A_{città} \cdot (1 - HB) \quad (12)$$

nella quale HB rappresenta la percentuale di densità degli edifici rispetto l'area della città.

Nell'equazione 10 si ha V_{canyon} che rappresenta il volume del canyon [m^3], calcolato come:

$$V_{canyon} = A_{città} \cdot h_{aver_{building}} \quad (13)$$

dove $h_{aver_{building}}$ è l'altezza media degli edifici presenti in città [m].

$\dot{V}_{inf}$ è flusso di aria uscente dall'immobile [m^3/s]; H_{waste} e $H_{traffic}$ sono i flussi termici rispettivamente di espulsione degli impianti di condizionamento e del calore antropogenico dovuto dagli autoveicoli [W] e u_{ex} [m/s] è la velocità di scambio tra l'aria presente nel volume del canyon cittadino e nello strato situato sopra la città. Per determinare tale velocità si è scelto di seguire la nuova equazione proposta da Bueno, nell'appendice A [21], la quale risulta essere

così definita:

$$u_{ex} = C_{ex} \cdot u_{*_f} \tag{14}$$

dove C_{ex} è una costante del coefficiente della velocità di scambio pari a 0.3; u_{*_f} è la velocità di attrito modificata definita come segue [m/s];

$$u_{*_f} = \max\,(u_*, w_*) \tag{15}$$

nella quale w_* [m/s] è la velocità convettiva che tiene conto dei movimenti dell'aria dovuti alla brezza urbana, per cui risulta:

$$w_* = \left(\frac{9.81 \cdot H_{urb} \cdot z_{ref}}{\rho \cdot c_p \cdot T_{urb}}\right)^{1/3} \tag{16}$$

dove, H_{urb} [W/m^2] e T_{urb} [K] sono rispettivamente il calore sensibile e la temperatura dell'area urbana; z_{ref} è l'altezza di riferimento ed è stato posta pari a 150 m. Infine, si è definito u_* [m/s], ossia la velocità di attrito che è definita per il sito urbano come segue:

$$u_* = \frac{K * u_b}{\ln\left(\frac{z_b - d_u}{z_{ou}}\right)} \tag{17}$$

dove, $z_b = 2 \cdot h_{aver_{building}}$ [m]; $K = 0.4$ è la costante di von-Karman; d_u e z_{ou}, sono rispettivamente lo sviluppo del piano che suddivide l'UBL con l'UCL e l'estensione della rugosità urbana, dovuta alla diversa conformazione degli edifici; quest'ultimi due sono definiti dalle seguenti formule:

$$z_{ou} = h_{aver_{building}} \cdot \lambda_f \;\; se \;\; \lambda_f < 0.15 \tag{18}$$
$$z_{ou} = h_{aver_{building}} \cdot 0.15 \;\; se \;\; \lambda_f \geq 0.15$$

$$d_u = 3 \cdot h_{aver_{building}} \cdot \lambda_f \; se \;\; \lambda_f < 0.05 \tag{19}$$
$$d_u = \left(0.15 + 5.5 \cdot \left(\lambda_f - 0.05\right)\right) \cdot h_{aver_{building}} \;\; se \;\; 0.05 \leq \lambda_f < 0.15$$
$$d_u = \left(0.7 + 0.35 \cdot \left(\lambda_f - 0.15\right)\right) \cdot h_{aver_{building}} \;\; se \; 0.15 \leq \lambda_f < 1$$

dove $\lambda_f = VH/4$ è l'indice dell'area frontale in funzione del rapporto dell'area urbana VH, definito come l'area esterna degli edifici divisa per l'area del sito urbano. Mentre u_b[m/s] è la velocità del vento ad un'altezza pari al limite inferiore del UBL (z_r) calcolata come segue:

$$u_b = u_m \left(\frac{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{or}}\right)}{\ln\left(\frac{z_m}{z_{or}}\right)} \right) \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{z_b}{z_{ou}}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{ou}}\right)} \right) \tag{20}$$

Come ultima velocità si calcola l'aria all'interno del canyon u_{can} [m/s], seguendo la correlazione di Bentham e Bitter:

$$u_{can} = u_{*_f} * \left(\frac{8}{VH_{urb}} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{21}$$

Nell' equazione 9 i coefficienti di scambio termico h_r e h_w [W/(m^2*K)] sono da considerare complessivi sia dello scambio termico di tipo convettivo che radiante, per cui:

$$h_r = 5.8 + 3.7 * u_{can} + h_{rad_r} \tag{22}$$

$$h_w = 5.8 + 3.7 * u_{atm} + h_{rad_w} \tag{23}$$

Infine, per determinare la temperatura del suolo stradale dell'equazione 11 si è eseguita la stessa metodologia illustrata per il terreno nel modello RSM, solo che in questo caso ciò che varia è la radiazione incidente sulla strada. Essa varierà a seconda dell'altezza degli edifici e dei giochi di ombre che si creano lungo la giornata diurna, per cui si è calcolato una orientazione media del canyon urbano a cui associare la radiazione incidente sulla strada e riflessa dagli edifici.

La radiazione incidente sulle pareti Q_w e sulla strada Q_r, risulta essere calcolata rispettivamente nelle seguenti equazioni:

$$Q_w = Q_{dir} \left(\frac{w_r}{h_{aver_{building}}} \left(0.5 - \frac{\theta_0}{\pi} \right) + \frac{1}{\pi} \tan(\lambda) \left(1 - \cos(\theta_0)\right) \right) + F_w \cdot Q_{diff} \tag{24}$$

$$Q_r = Q_{dir}\left(\left(\frac{2*\theta_0}{\pi}\right) + \frac{2*h_{aver_{building}}}{\pi*w_r}\cdot\tan(\lambda)\,(1-\cos(\theta_0))\right) + F_r Q_{diff} \tag{25}$$

dove Q_{dir} e Q_{diff} sono rispettivamente l'irradianza diretta e diffusa [W/m^2]; w_r è la lunghezza media della strada [m] calcolata come:

$$w_r = \frac{2h_{aver_{building}}(1-HB)}{VH_{urb}} \tag{26}$$

mentre λ è l'angolo zenith solare [rad]; θ_0 è l'orientazione critica del canyon per la quale la strada non è più illuminata dal sole [rad]:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\min\left[\frac{w_r}{h_{aver_{building}}*\tan(\lambda)}, 1\right]\right) \tag{27}$$

ed infine F_r, F_w sono i fattori di vista della strada e delle pareti con la volta celeste:

$$F_r = \left(\left(\frac{h_{aver_{building}}}{w_r}\right)^2 + 1\right)^{1/2} \tag{28}$$

$$F_r = \frac{1}{2}\left[\frac{h_{aver_{building}}}{w_r} + 1 - \left(\left(\frac{h_{aver_{building}}}{w_r}\right)^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}\right] \tag{29}$$

Dopo aver determinato l'effetto della radiazione diretta sulle pareti e sugli edifici, si calcolano le riflessioni solari per le pareti degli immobili e per la strada:

$$M_w = \frac{R_w + F_w\rho_w R_r}{1-(1-2F_w)\rho_w + (1-F_r)F_w\rho_w\rho_r} \tag{30}$$

$$M_w = \frac{R_r + (1-F_r)\rho_r(R_w + F_w\rho_w R_r)}{1-(1-2F_w)\rho_w + (1-F_r)F_w\rho_w\rho_r} \tag{31}$$

dove ρ_r e ρ_w sono rispettivamente la riflettività della strada e delle pareti, $R_w = \rho_w K_w$ e $R_r = \rho_r K_r$.

Quindi, l'irradianza totale ricevuta dalle pareti e dalla strada è data da:

$$S_w = K_w + (1 - 2F_w)M_w + F_w M_r \tag{32}$$

$$S_r = K_r + (1 - F_r)M_w \tag{33}$$

Una volta calcolato quanta irradianza riceve la strada è così possibile risolvere le equazioni analoghe della suddivisione del suolo anche per il manto stradale, al fine di trovare la temperatura della strada T_r.

Quindi per concludere, dopo aver determinato i diversi fattori dell'equazione 11 è possibile determinare anche il calore specifico urbano H_{urb} [W/m^2], tramite la seguente equazione:

$$H_{urb} = u_{ex}\rho c_p(T_{urb} - T_{UBL}) + h_w(T_w - T_{UBL}) + H_{waste} \tag{34}$$

2.2 MODELLI DI VALUTAZIONE DEL CALORE RILASCIATO DAGLI IMPIANTI DI CONDIZIONAMENTO

La valutazione del calore rilasciato dagli impianti di condizionamento estivo è una variabile rilevante nel calcolo della temperatura ambiente, nelle città densamente abitate. Ciò è spiegato dalla alta presenza di immobili adibiti a uffici, centri commerciali e hotel di grandi dimensioni che utilizzano un sistema di raffrescamento ad aria per la stagione estiva. Tali sistemi necessitano di alti consumi di energia, in quanto l'aria a differenza di altre risorse, come l'acqua, ha una bassa densità e quindi necessita di grandi portate per scambiare la stessa quantità di calore. Inoltre, l'efficienza per tali impianti dipende strettamente dalle condizioni psicometriche dell'aria, pertanto si ottengono delle rese variabili nel corso dell'anno in base alle condizioni climatiche. In questo contesto assume una rilevante importanza il calcolo del coefficiente EER (Energy Efficiency Ratio), dato dal rapporto tra la potenza frigorifera fornita e la potenza elettrica assorbita. Questo rapporto rappresenta un valore istantaneo che varia in funzione della temperatura esterna e della temperatura interna di set point nell'edificio. Ne deriva quindi una stretta connessione con l'effetto provocato dall'UHI, per cui all'aumentare di tale fenomeno peggiora l'efficienza della macchina frigorifera e quindi aumentano i consumi di energia elettrica. Per determinare questo dato sono state utilizzate, nell'elaborazione di questa tesi, due diverse possibilità, una seguendo la norma UNI/TS 11300-3:2010 e l'altra utilizzando una equazione empirica, che verrà spiegata nel paragrafo successivo.

2.2.1 EQUAZIONE POLINOMIALE EMPIRICA

In letteratura sono presenti molti modelli riguardanti il calcolo dell'EER per condizionatori di tipo on/off, i quali oltre a presentare basse efficienze stanno cedendo il passo nel mercato a climatizzatori dotati di inverter. Per questi sistemi più performanti, in letteratura è presente uno studio in cui si determina il valore del EER tramite una equazione empirica [22]. Il modello include curve di efficienza (EER) che dipendono dal valore istantaneo del fabbisogno termico da fornire alla zona termica Q_{ev} e dalla temperatura dell'ambiente esterno T_{amb}, per cui $\eta_1 = f\ (Q_{ev}, T_{amb})$. La funzione f è modellata con una polinomiale, determinata in base al modello di condizionatore utilizzato e alla temperatura di set point, impostata nel seguente caso a 26°C.

$$\eta_1 = a_0 + a_1 T_{amb} + a_2 T_{amb}^2 + a_3 Q_{ev}/n_{cond} + a_4 T_{amb} Q_{ev}/n_{cond} + a_5 Q_{ev}^2/n_{cond} \tag{35}$$

Dove i coefficienti $a_i, i \in \{0,1,\ldots,5\}$ sono identificati in base ai dati sperimentali per un dato condizionatore, che nel caso dello studio sono definiti nella seguente tabella.

Tabella 2: coefficienti per la funzione EER - Fonte Jan [22]

a_0	11.2
a_1	-0.363
a_2	$2.6 * 10^{-3}$
a_3	0.829
a_4	$6.9 * 10^{-3}$
a_5	-0.159

Nell'implementazione del codice di calcolo di questo elaborato, il valore di potenza frigorifera richiesta dalla zona termica viene riscalata rispetto al valore di potenza nominale del modello di condizionatore, in maniera da definire un numero fittizio di condizionatori n_{cond} necessari per fornire la potenza termica voluta.

L'equazione 35 è stata utilizzata nel caso di condizionatori con inverter, mentre per la modellizzazione di sistemi senza inverter si utilizza la seguente correlazione [23]:

$$\eta_2 = -0.14 \cdot (T_{amb} - 35) + \eta_0 \tag{36}$$

dove η_0 è il valore di targa del EER del condizionatore, definito a 35°C di temperatura esterna e 27°C di temperatura interna. Tale equazione risulta essere valida solo se la T_{amb} è compresa tra 20°C e 35°C.

Dopo aver definito il coefficiente di prestazione nei due casi è possibile calcolare il calore di condensazione Q_{cond} [kW] come:

$$Q_{cond} = Q_{ev} \cdot \frac{1+EER}{EER} \tag{37}$$

Il calore ceduto all'esterno è uno dei due output di questo modello, l'altro è la potenza elettrica P_{el} [kW] consumata dall'impianto di condizionamento dell'edificio, calcolata come:

$$P_{el} = Q_{cond} - Q_{ev} \tag{38}$$

2.2.2 CONFRONTO TRA LA POLINOMIALE E LA NORMA UNI/TS 11300-3:2010

Prima di procedere alle effettive simulazioni energetiche del distretto di Padova, si è deciso di valutare quale metodo utilizzare per il calcolo del calore di scarto dagli split, all'interno del programma di modellizzazione energetica. La scelta è stata fatta prendendo in considerazione i due metodi empirici, spiegati nel paragrafo precedente, e la normativa UNI/TS 11300-3 del 2010. Il confronto per queste diverse tipologie di calcolo è stato eseguito per quattro edifici adibiti ad uso residenziale, dotati di un impianto di condizionamento estivo ad aria.

Figura 11: Immobili residenziali del distretto universitario

Tale analisi risulta essere agevolata dal caso studio utilizzato, in quanto si conoscono in

maniera dettagliata le caratteristiche strutturali degli edifici, l'effettiva presenza di persone al suo interno e l'utilizzo degli impianti. Gli edifici presi in esame presentano le stesse morfologie strutturali, in quanto hanno le medesime trasmittanze termiche totali [W/m^2 K] per le pareti verticali e orizzontali. I valori per ogni superficie sono stati riportati nella seguente tabella.

Tabella 3: Trasmittanza pareti verticali e orizzontali

Superficie	**Trasmittanza (*U*)** $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
Parete$_{est}$	1.16
Parete$_{int}$	1.41
Solaio	1.17
Pavimento	0.84
Copertura	1.07

La normativa UNI/TS 11300-3 [24] prevede il calcolo del EER in funzione del fattore di carico (*F*) dell'impianto di condizionamento (in questo caso aria–aria), così da definire la curva di funzionamento a carichi parziali della macchina frigorifera. Tale suddivisione ripartita per i fattori di carico del 100%, 75%, 50% e 25% è necessaria per calcolare il valore orario del coefficiente di prestazione (η_{mm}) tramite la seguente equazione di calcolo, da ripetere nei mesi di climatizzazione estiva:

$$\eta_{mm} = EER(F_k) \cdot \eta_1(F_k) \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_7 \tag{39}$$

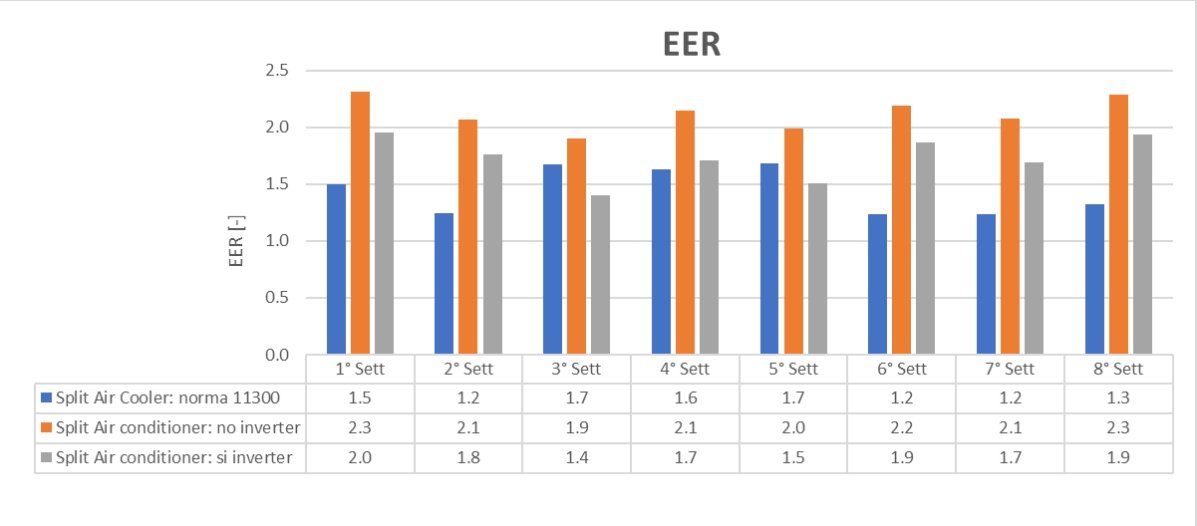
Dove F_k è il fattore di carico medio del mese k, $EER(F_k)$ si ricava dalla curva a carichi parziali degli EER, $\eta_1(F_k)$ è un coefficiente correttivo che tiene conto di temperature differenti da quelle considerate per valutare gli EER, ricavabile dai prospetti dell'appendice C, e infine $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7$ si ricavano dall'appendice D della normativa.

Una volta definito η_{mm} è possibile definire la potenza elettrica consumata dall'impianto P_{el} [kW] e il calore disperso al condensatore Q_{cond} [kW] tramite le seguenti equazioni:

$$P_{el} = \frac{Q_{ev}}{\eta_{mm}} \tag{40}$$

$$Q_{cond} = P_{el} + Q_{ev} \tag{41}$$

L'analisi comparativa tra la normativa appena spiegata e le due equazioni empiriche 35, 36 nasce in quanto si deve scegliere quale metodologia di valutazione del EER sarebbe più opportuno utilizzare all'interno del codice di calcolo dell'isola di calore. Dai risultati ottenuti per i quattro edifici si evince come il metodo di stima del EER per i condizionatori privi di inverter, mostri dei valori più alti e più variegati nel corso delle giornate rispetto agli altri metodi. Ciò è visibile nella (*fig. 12),* nella quale si è calcolato l'efficienza media mensile degli impianti con una temperatura di set point interna impostata a 26°C, e risulta spiegato dal fatto che l'equazione 36 dipenda esclusivamente dalla temperatura esterna e non tenga conto del fattore di carico dell'impianto di condizionamento. Questa ultima caratteristica non viene presa in considerazione dalla correlazione in quanto per condizionatori privi di inverter e quindi dotati di una regolazione on/off del compressore, non possono modulare la potenza utilizzata in funzione della potenza richiesta e quindi lavorano sempre in condizioni di carico nominale. Questo motivo giustifica il fatto che tali condizionatori presentano efficienze maggiori nel modello, lavorando nella condizione di design. Oggi sul mercato si trovano nella quasi totalità dei casi, i condizionatori ad inverter e anche a causa di ciò è stata rifiutata la scelta di questa modalità per il calcolo del EER.



	1° Sett	2° Sett	3° Sett	4° Sett	5° Sett	6° Sett	7° Sett	8° Sett
Split Air Cooler: norma 11300	1.5	1.2	1.7	1.6	1.7	1.2	1.2	1.3
Split Air conditioner: no inverter	2.3	2.1	1.9	2.1	2.0	2.2	2.1	2.3
Split Air conditioner: si inverter	2.0	1.8	1.4	1.7	1.5	1.9	1.7	1.9

Figura 12: Grafico EER medi settimanali nelle otto settimane, da luglio ad agosto

In antitesi con tale comportamento si ha l'andamento medio mensile della normativa UNI/TS 11300, la quale ha un andamento più stabile e più basso rispetto alle altre curve. Questo effetto è dovuto essenzialmente al maggior peso dato all'energia frigorifera richiesta dall'edificio che si misura nel fattore di carico. Infatti, dall'equazione 39 si nota come entri in gioco il fattore di carico medio mensile, sicché nella *fig.13* risulta giustificato il comportamento su base oraria

rappresentato. Si nota come dalle ore 17:00 alle ore 1:00 il valore degli EER per le due equazioni empiriche aumenti, in quanto diminuisce la temperatura esterna, ma il valore dell'efficienza della normativa continui a calare e ciò è dovuto al fatto che il fattore di carico diminuendo nelle ore notturne e avendo un peso alto all'interno dell'equazione, riduca a sua volta il valore del EER. Questo è stato il motivo principale per cui non si è deciso di utilizzare tale metodologia, poiché nel caso del programma di calcolo costruito e spiegato nei capitoli successivi, si utilizza una metodologia semplificata per calcolare il fattore di carico dell'edificio; onde per cui si è evitato di dare eccessivo risalto a tale valore, privilegiando perciò il metodo dei condizionatori ad inverter per le successive analisi.

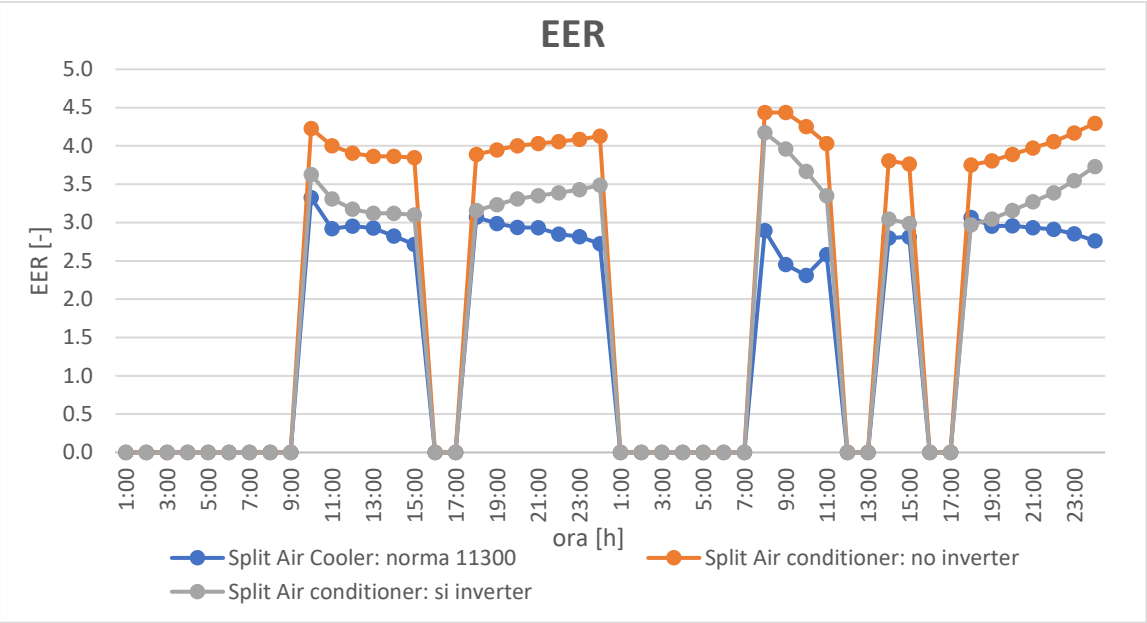


Figura 13: Grafico del EER orario per i giorni 1/7 e 2/7

Questa scelta risulta ponderata anche dal fatto che l'equazione 35 è funzione sia della temperatura esterna che della potenza frigorifera richiesta dall'edificio e ciò comporta ad avere un andamento compreso tra la normativa e la curva dei sistemi privi di inverter, tenendo conto anche del fattore di carico seppur in maniera meno rilevante rispetto alla norma UNI/TS 11300.

2.3 MODELLO DI VALUTAZIONE DEL CALORE ANTROPOGENICO

La quantità di energia rilasciata a seguito delle attività umane, pur essendo inferiore rispetto all'energia solare totale che viene intercettata dalla terra, è rilevante nelle zone urbane e contribuisce attivamente ad aumentare il fenomeno del UHI. Il calore antropogenico è uno dei

fattori che causano la formazione dell'isola di calore nell'area urbana e pur essendo di difficile valutazione a causa della sua grande variabilità nel tempo e nello spazio, sono stati implementati alcuni modelli per poterlo determinare. Alcune stime valutano che il calore prodotto dalle attività umane possa variare tra i 20 e i 70 [W/m^2] nelle città, anche se ci sono località che presentano dei picchi estremi, come a New York in cui si raggiungono 577 [W/m^2] [25]. Si intuisce così come le stime del flusso di calore antropogenico sono necessarie affinché tutte le città siano in grado di documentare l'entità degli effetti e affinché l'impatto di tale flusso possa essere incluso nella modellizzazione urbana.

Un esempio di modello di simulazione è LUCY (L*arge scale Urban Consumption of Energy*), tramite il quale si possono determinare tutte le componenti del calore antropogenico. Il metodo include un database di diversi modelli per le attività umane, per il traffico e il consumo di energia di ogni paese ed è open-source. Il modello di simulazione suddivide le fonti del flusso di calore antropogenico Q_f come segue [W]:

$$Q_f = Q_V + Q_B + Q_M \tag{42}$$

dove Q_V è il calore prodotto dai veicoli, Q_B è il calore rilasciato dagli edifici e Q_Mè il calore del metabolismo umano [26].

Queste tre diverse componenti hanno pesi assai differenti nella determinazione del flusso di calore totale, onde per cui nella maggioranza dei modelli si trascura il calore generato dall'attività umana che vale solo il 2-3% del totale calore Q_f [27]. Del tutto opposto il caso degli edifici che sono i principali emettitori, contribuendo a circa il 60% delle emissioni totali della città rispetto a quasi il 32% per il traffico stradale [28]. Tenendo conto di queste considerazioni, si è optato di utilizzare nelle simulazioni solo l'effetto del calore di scarto degli edifici e del traffico. La quantificazione del primo è già stata largamente spiegata nel paragrafo precedente, mentre il secondo verrà spiegato nel seguente paragrafo.

La combustione del carburante è la principale fonte di calore dei veicoli a motore. Chiaramente vi è un forte ciclo diurno al traffico, che è ben documentato nei dati di conteggio del traffico, con picchi al mattino e al tardo pomeriggio, che generalmente non variano da una stagione all'altra. In passato, la quantificazione delle emissioni di calore prodotte dal traffico è stata generalmente ottenuta utilizzando un approccio relativamente semplicistico a causa della mancanza di informazioni dettagliate sulla variazione della densità del traffico nel tempo. Ad esempio, le vendite di benzina e diesel sono state utilizzate come valore per il consumo di energia del traffico stradale, semplicemente moltiplicando le vendite annuali di una

zona per la percentuale della popolazione che vive in quella zona urbana. Nelle simulazioni si è deciso di seguire l'approccio bottom-up della modellizzazione del Q_V di Smith [25], nel quale si utilizzano dati dettagliati del traffico per diverse tipologie di veicoli (autovetture, motocicli e mezzi pesanti) e diversi tipi di carburante. Così che una volta stabiliti il numero di veicoli per mille abitanti e le distanze mediamente percorse, che variano da nazione a nazione, il valore di Q_V è stimato in base al consumo di carburante a seconda della velocità media e del tipo di combustibile, dalla seguente equazione [W/m^2]:

$$Q_V = \frac{(V_C E_C + V_M E_M + V_{FR} E_{FR}) F \cdot 24 \cdot PDH_W}{3600000} \tag{43}$$

dove V_C, V_M, V_{FR} rappresentano rispettivamente, il numero di automobili, il numero di motocicli e il numero di mezzi pesanti per 1000 abitanti. Essi sono dei dati nazionali che sono stati reperiti, nel caso italiano, dal sito del ACI per l'anno 2019 [29]:

- $V_C = \frac{655}{1000} \frac{autovetture}{1000\ abitanti}$
- $V_M = \frac{114}{1000} \frac{motocicli}{1000\ abitanti}$
- $V_{FR} = \frac{88}{1000} \frac{mezzi\ pesanti}{1000\ abitanti}$

E_C, E_M e E_{FR} sono i fattori di emissione per le tre diverse tipologie di veicoli a motore che dipendono dalla velocita [W/m]. Tali valori sono stati ripresi dalla Tab.4 del documento [28], considerando una velocità media dei veicoli di 48 [km/h] nell'area urbana. I coefficienti di emissione si riferiscono ai veicoli della categoria EURO 2 che rappresentano ad oggi, nel parco auto italiano, solo l'8.4% del totale [30]. Questa decisione peggiorativa deriva dal fatto che venga trascurata la presenza del traffico, il quale provoca un generale aumento dei consumi e, di conseguenza, delle emissioni. Si ottengono, quindi, i seguenti valori:

- $E_C = 25.92 \frac{W}{m}$
- $E_M = 13.16 \frac{W}{m}$
- $E_{FR} = 108.42 \frac{W}{m}$

Infine, F è un fattore moltiplicativo che permette di modificare il numero totale di veicoli, D è la distanza in un'ora di viaggio [m], e H_w è la frazione oraria del numero totale di veicoli presenti nei giorni feriali e festivi in strada. Il numero orario di veicoli è stato moltiplicato per 24 così da ottenere il numero massimo di veicoli giornaliero ed è stato diviso per 1000 persone

e per 3600 s per avere un valore orario medio delle emissioni di calore legate al traffico.

Dall'equazione 43 è stato quindi possibile ricavare il calore rilasciato dal traffico nel canyon urbano, una delle variabili nel calcolo della temperatura esterna dell'area urbana è nei successivi capitoli viene analizzato l'effetto che ha tale parametro sull'isola di calore.

2.4 MODELLO DELLA ZONA TERMICA

Per il calcolo del calore sensibile e latente richiesto dagli edifici nelle stagioni di raffrescamento e riscaldamento si è seguito il modello della zona termica già sviluppato all'interno del codice EUReCA. A differenza di molti programmi di simulazione energetica per gli edifici (UBEM) in cui si eseguono i bilanci termici simultaneamente per ogni singolo elemento dell'edificio, è stato considerato più adatto utilizzare un metodo semplificato con una sola zona termica per ogni edificio. Così facendo si è potuto ridurre il carico di memoria di archiviazione richiesto dal programma e accelerare i tempi di simulazione. Questa scelta è il vantaggio principale di un modello semplificato, rispetto ad un metodo dettagliato nell'analisi di un'area cittadina che racchiude centinaia di edifici.

EUReCA rappresenta un modello a parametri concentrati, che si basa su un'analogia elettrica, tramite la quale tutti i diversi parametri dell'edifico vengono rappresentati da resistenze e capacità termiche interconnesse tra di loro. All'interno del codice di calcolo sono stati implementati, dai ricercatori dell'Università di Padova, due diverse possibilità di analisi, una seguendo la normativa ISO 13790 [31] in cui si hanno 5 resistenze e 1 capacità (5R1C) e l'altra considerando la norma tedesca VDI 6007 [32] con 7 resistenze e 2 capacità (7R2C). I due metodi sono rappresentati nella seguente figura.

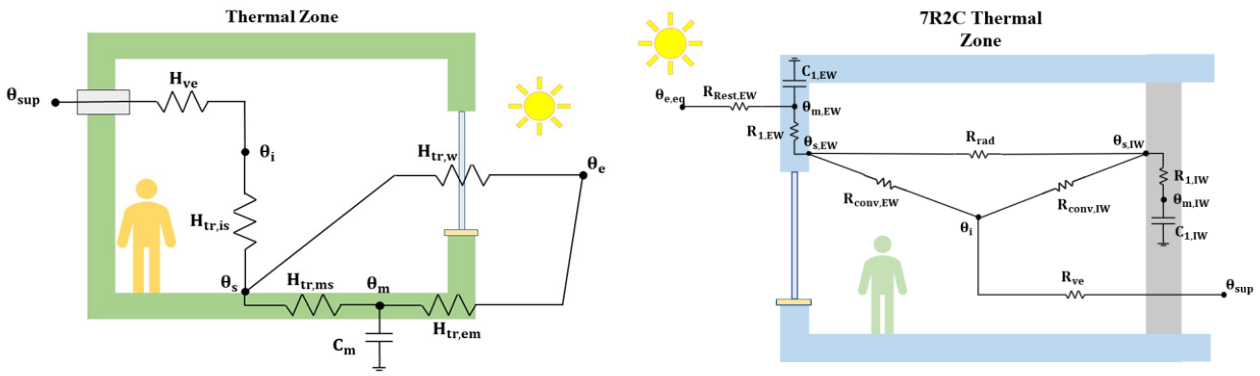


Figura 14: Schema del modello 5R1C e 7R2C

Entrambi queste metodologie, seppur presentando diverse caratteristiche modellistiche, che saranno brevemente descritte successivamente, permettono di definire i bilanci termici tramite delle equazioni lineari, con un sistema formato da n equazioni pari al numero di nodi.

Nel modello della norma ISO 13790 si considera il circuito equivalente composto dalle seguenti cinque resistenze termiche: H_{ve} coefficiente di ventilazione; $H_{tr,is}$ conduttanza di accoppiamento; $H_{tr,em}$ e $H_{tr,ms}$ coefficienti di trasmissione delle superfici opache e $H_{tr,w}$ coefficiente di trasmissione termica delle superfici trasparenti e da una capacità termica concentrata C_m. I bilanci termini vengono eseguiti ai nodi della rete elettrica che in questo caso sono le tre temperature θ_{air}, θ_s e θ_m [°C], rispettivamente la temperatura interna della stanza, la temperatura sulla superficie delle pareti e la temperatura della massa termica. Quindi oltre alle tre variabili appena descritte, ci sono le due condizioni al contorno della temperatura esterna θ_e e della temperatura di immissione nella UTA (Unità Trattamento Aria) θ_{sup}, necessarie per definire le tre equazioni di bilancio termico:

$$H_{ve}\left(\theta_{sup} - \theta_{air}\right) + H_{tr_{is}}(\theta_S - \theta_{air}) + \Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd} = 0 \tag{44}$$

$$H_{tr,w}(\theta_e - \theta_s) + H_{tr_{is}}(\theta_{air} - \theta_s) + H_{tr_{ms}}(\theta_m - \theta_s) + \Phi_{ST} = 0 \tag{45}$$

$$H_{tr_{em}}(\theta_e - \theta_m^{\tau}) + H_{tr_{ms}}(\theta_s - \theta_m^{\tau}) + \Phi_m = \frac{C_m}{\Delta\tau}(\theta_m^{\tau} - \theta_m^{\tau-\Delta\tau}) \tag{46}$$

dove $\Phi_{HC,nd}$ è il carico termico dell'edificio collegato al noto dell'aria e $\theta_m^{\tau-\Delta\tau}$ è la temperatura connessa al nodo massivo nell'intervallo di tempo precedente. Il sistema di equazioni così scritto ha due modi per essere risolto, uno impostando la temperatura di set-point interna θ_i [°C] calcolando la potenza frigorifera e termica richiesta dalla zona termica, l'altro fissando la potenza fornita $\Phi_{HC,nd}$ [kW] e calcolando la temperatura che si raggiunge all'interno della zona termica. Nel caso di studio analizzato in questo lavoro di tesi viene impostata la prima modalità di risoluzione del sistema quando il sistema di HVAC è acceso, mentre quando l'impianto è spento si impone una potenza richiesta dall'edifico e si calcola la temperatura che si raggiunge al suo interno.

Il modello della norma ISO 13790 non considera il calcolo del carico latente Φ_{lat} per gli edifici, così nel modello di EUReCA è stata implementata un'ulteriore funzione per il calcolo del bilancio di vapore necessario soprattutto per la deumidificazione estiva, seguendo tale bilancio termico:

$$\Phi_{lat} = G_{da}\left(x_{ext} - x_{int,set}\right) \cdot \left(r_o + c_{pv}\theta_{air}\right) + G_v(r_0 + c_{pv}\theta_{air}) \tag{47}$$

dove x_{ext} è l'umidità specifica dell'ambiente esterno [g_v/kg_{as}]; $x_{int,set}$ è l'umidità specifica interna [g_v/kg_{as}]; r_0 è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua uguale a 2501 kJ/kg a 0°C; c_{pv} è il calore specifico del vapore uguale a 1875 J/(kg K) e infine Gv è la generazione interna di vapore in [kg_v/s]. Prima di determinare il fabbisogno energetico dell'edificio è necessario inizializzare la zona termica, del seguente modello, tramite la determinazione delle resistenze e capacità termiche, dei carichi interni e solari con le equazioni proposte nella normativa così da ottenere i carichi termici ai nodi. Infine, le simulazioni vengono eseguite per ogni edificio in ogni intervallo di tempo scelto dall'utente, impostato di default pari ad un'ora.

Nel modello 7R2C della norma tedesca VDI 6007 si introduce una maggior numero di nodi nel circuito equivalente, ma questa apparente complicazione permette di migliorare la modellizzazione del carico termico orario, avvicinando di molto i risultati di tale metodo semplificato a quelli ottenuti con un metodo dettagliato, come EnergyPlus. Il programma 7R2C presenta lo stesso flusso di lavoro del modello 5R1C, poiché seppur cambiando il numero e la definizione dei parametri resistivi e capacitivi, si procede alla risoluzione del sistema lineare sempre valutando se l'impianto sia in funzione o meno. Senza addentrarci molto nella spiegazione di tale modello, dato che non rappresenta lo scopo di questo elaborato, si può evidenziare come il sistema di calcolo sia distinto per due tipologie di strutture dell'edificio, le adiabatiche e le non adiabatiche, ognuna delle quali definisce i suoi parametri del circuito elettrico. Le perdite di ventilazione ed infiltrazione sono definite da resistenze termiche e il ramo che si riferisce alle pareti non adiabatiche viene collegato al nodo della temperatura esterna equivalente, definita dalla combinazione della temperatura esterna di bulbo secco e della radiazione solare e infrarossa assorbita o ceduta.

Per concludere, entrambe le due possibilità di calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio sono state programmate nel linguaggio Python, che permette grandi libertà e adattabilità grazie alla programmazione ad oggetti e all'importazione di librerie atte a risolvere velocemente i sistemi lineari.

2.5 MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCALDAMENTO GLOBALE

In questo paragrafo viene presentato il modello utilizzato dal software *CCWorldWeatherGen* [43] per valutare l'effetto del riscaldamento globale nella città desiderata. Il programma necessita come dato di input, del file climatico della località in formato EPW. Tale formato è

disponibile per molte città del mondo e dunque risulta usufruibile per molti casi di studio.

Il programma ha l'obiettivo di modificare il file climatico iniziale, andando a variare per uno scenario futuro, diverse variabili. A tale scopo si utilizzano le stime fatte dal *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* nel terzo report (*Third Assessment Report)* pubblicato nel 2001 [44]. Le variazioni climatiche dovute al riscaldamento globale sono recuperate da uno dei maggiori modelli utilizzati dal *IPCC* per il terzo report, il modello inglese *HadCM3* (*Hadley Centre Coupled Model 3*).

Tra alcune delle variabili che verranno mostrate in questo paragrafo troviamo:

- la temperatura di bulbo secco [°C];
- l'umidità relativa [%];
- la radiazione orizzontale extraterrestre [Wh/m^2];
- la radiazione orizzontale globale e diffusa [Wh/m^2].

Le equazioni riportate in questo paragrafo sono state recuperate dal manuale tecnico del software e rappresentano solo alcune delle correlazioni utilizzate nel software. Quindi, per una visione più approfondita del metodo, si consiglia la lettura del documento *Technical reference* [33].

Iniziando dalla modifica per la temperatura a bulbo secco si è seguita la seguente equazione:

$$\alpha dbt_m = \frac{\Delta T_{MAX_m} - \Delta T_{MIN_m}}{(dbt_{0,max})_m - (dbt_{0,min})_m} \tag{48}$$

dove αdbt_m è il fattore che modifica la temperatura di bulbo secco mensile per lo scenario futuro; ΔT_{MAX_m} e ΔT_{MIN_m} sono le previsioni future, rispettivamente la massima e la minima, di variazione assoluta della temperatura di bulbo secco media giornaliera per un dato mese *m* [°C]; infine $(dbt_{0,max})_m$ e $(dbt_{0,min})_m$ sono le medie giornaliere della temperatura di bulbo secco, rispettivamente, massima e minima, del file climatico odierno [°C].

Quindi la temperatura di bulbo secco futura per ogni ora è definita dalla seguente equazione:

$$dbt = dbt_0 + \Delta TEMP_m + \alpha dbt_m (dbt_0 - (dbt_0)_m) \tag{49}$$

dove dbt_0 è la temperatura di bulbo secco odierna [°C]; $\Delta TEMP_m$ è il valor medio della variazione della temperatura di bulbo secco per un dato mese in uno scenario futuro [°C]; $(dbt_0)_m$ è la temperatura di bulbo secco odierna mediata per un dato mese [°C].

Passando alla seconda variabile, si ha che l'umidità relativa futura è definita dalla seguente correlazione:

$$\phi = \phi_0 + \Delta RHUM_m \tag{50}$$

nella quale $\Delta RHUM_m$ è il valore previsto di variazione futura dell'umidità relativa media per un dato mese m [%].

Successivamente si sono calcolate le variazioni future della radiazione solare. Iniziando dalla radiazione orizzontale extraterrestre si è definita la seguente correlazione:

$$B = d \cdot \frac{360}{365.25} \tag{51}$$

Si è poi calcolata l'equazione del tempo per definire l'ora solare vera, tramite la seguente relazione:

$$ET = -0.128 \cdot sin(B - 2.8) - 0.165 \cdot sin(2 \cdot B + 19.7) \tag{52}$$

Così è stato possibile calcolare l'ora solare vera:

$$TSV = TL + \Delta T_Z - \left(\frac{\mathrm{LONG}}{15}\right) + \mathrm{ET} \tag{53}$$

dove TL è il tempo legale; ΔT_Z è la differenza dall'ora GMT; LONG è la longitudine del sito analizzato.

È stato poi possibile calcolare l'angolo orario come:

$$\omega = \frac{360}{24} \cdot (TSV - 12) \tag{54}$$

Prima di poter definire la posizione del sole si è dovuto calcolare la declinazione solare nel tempo, che rappresenta l'angolo tra la direzione del raggio solare e il piano equatoriale:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(360° \cdot \frac{284+n}{365}) \tag{55}$$

dove n il numero del giorno. Quindi l'angolo dell'altezza solare è dato dalla seguente

equazione:

$$sin\ \alpha = sin\ \delta \cdot \sin \mathrm{LAT} + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos LAT \tag{56}$$

dove LAT è la latitudine del sito. La radiazione orizzontale extraterrestre è quindi definita con tale equazione [W/m^2]:

$$I_{ex,hor} = sin\ \alpha \cdot I_0 \cdot \varepsilon_d \tag{57}$$

dove I_0 è la costante solare pari a 1367 W/m^2 ed ε_d è il fattore di correzione per la variazione della distanza tra il sole e la terra, definito come:

$$\varepsilon_d = 1 + 0.03344 \cdot \cos\,(B - 2.8) \tag{58}$$

La radiazione extraterrestre orizzontale è poi definita per ciascuna ora del time step del file climatico [Wh/m^2].

La radiazione orizzontale globale è stata definita calcolando prima il suo valor medio mensile $\left(I_{0,gbl}\right)_m$ [W/m^2]:

$$\left(I_{0,gbl}\right)_m = \frac{\left(\sum_{xem} I_{0,gbl} * 1000\right)}{h_m} \tag{59}$$

dove $\sum_{xem} I_{0,gbl}$ è la radiazione globale totale del caso odierno per un dato mese *m* [kWh/m^2] e h_m è il numero di ore del mese *m* [h].

Il fattore per modificare la radiazione odierna con quella futura, αI_m, è calcolato come segue:

$$\alpha I_m = 1 + \left(\frac{\Delta DSWF_m}{\left(I_{0,gbl}\right)_m}\right) \tag{60}$$

nella quale $\Delta DSWF_m$ è la variazione futura prevista per il flusso medio delle onde corte per un dato mese *m* [W/m^2].

Successivamente, è stato possibile definire la radiazione orizzontale globale I_{gbl} per uno scenario futuro in funzione della radiazione orizzontale globale odierna $I_{0,gbl}$:

$$I_{gbl} = \alpha I_m \cdot I_{0,gbl} \tag{61}$$

Infine, è stato possibile calcolare la radiazione solare diffusa tramite le due radiazioni precedentemente descritte. Si è definito inizialmente l'indice di chiarezza orario KT_h, il quale deriva dalla radiazione globale orizzontale futura e la radiazione extraterrestre come segue:

$$KT_h = \frac{I_{gbl}}{I_{ex,hor}} \tag{62}$$

Oltre all'indice di chiarezza oraria è richiesto anche tale indice su base giornaliera KT_d, che viene calcolato tramite la seguente correlazione:

$$KT_d = \frac{\sum_{h=1}^{24} I_{gbl}}{\sum_{h=1}^{24} I_{ex,hor}} \tag{63}$$

L'indice di chiarezza è stato suddiviso, in tre possibilità in base al momento della giornata, come segue:

$$\psi = \begin{cases} \frac{KT_{h-1}+KT_{h+1}}{2} & alba < h < tramonto \\ KT_{h+1} & h = alba \\ KT_{h-1} & h = tramonto \end{cases} \tag{64}$$

Ed è stato così possibile calcolare la radiazione diffusa futura [Wh/m^2]:

$$I_{dif,hor} = I_{gbl} \cdot \frac{1}{1+exp(-5.38+6.63KT_h+0.006TSV-0.007\alpha+1.75KT_d+1.31\psi)} \tag{65}$$

CAPITOLO 3

3.1 IL CASO DI STUDIO ANALIZZATO

Per analizzare il modello implementato in ambiente Python, si è deciso di utilizzare come caso studio una zona ristretta del centro storico della città di Padova. Il distretto analizzato contiene al suo interno 580 edifici, nel quale la maggioranza è rappresentata da immobili ad utilizzo residenziale. Difatti essi rappresentano il 94% del totale, mentre la restante parte è così suddivisa: 3% per edifici ad uso commerciale, 1% uffici e 2% per edifici adibiti a servizi come l'università. L'area totale del distretto ha uno sviluppo di 0.53 km^2. Il distretto viene importato da un file georeferenziato CityJSON che fornisce direttamente una rappresentazione 3D degli edifici della città. Con un numero così elevato di edifici, risulta impossibile conoscere in maniera dettagliata le strutture e le caratteristiche di costruzione di ciascun immobile. Il file CityJSON contiene al suo interno le informazioni riguardanti la destinazione d'uso, la classe di età e la struttura degli edifici; dove le prime due proprietà sono state associate in maniera casuale agli edifici basandosi su dati statistici nazionali, ISTAT [34]. Una volta caricate queste informazioni, è stato calcolato il numero di piani degli edifici, come il rapporto tra l'altezza dell'edificio e l'altezza del singolo piano.

Per questo caso di studio si è utilizzato un file georeferenziato di tipo CityJSON, ma il programma EUReCA è in grado di lavorare anche con file GeoJSON, che pur rappresentando gli edifici in maniera bidimensionale, permette di passare ad una configurazione 3D tramite l'estrusione delle piante degli edifici fino all'altezza dell'edificio.

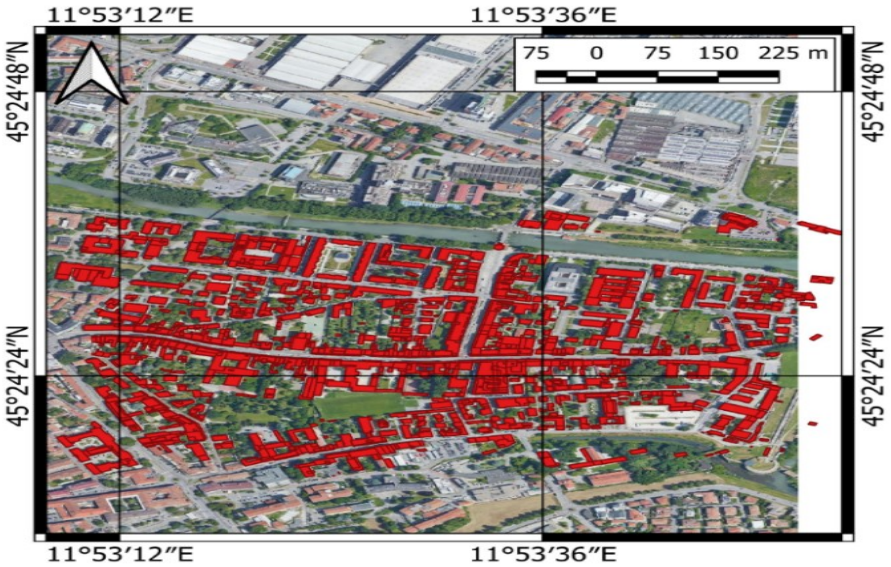


Figura 14: Rappresentazione del caso di studio, distretto Belzoni a Padova

3.2 IL MODELLO RC

Il primo studio riguardante l'utilizzo dell'analogia elettrica per descrivere il comportamento dinamico degli immobili, risale al 1936 con *Beuken* [34]. In tali modelli, il dominio del sistema è composto da una serie di nodi connessi tra di loro da resistenze e capacità termiche. Nel caso di *Beuken* si fece uso di sole capacità termiche e questa modalità venne ripresa nel 1972 da *Rouvel* [36] e programmata all'interno del software *GEBSIMU.*

Successivamente fu eseguito un nuovo studio nel 1980 da *Laret* [37] che considerava un semplice modello ad un nodo composto da una capacità e due resistenze termiche. Seguirono tale approccio nuovi studi che raggrupparono in un modello di due costanti temporali, per il volume d'aria e per la struttura dello stabile, tutti gli elementi costitutivi della zona termica. Tale soluzione fu poi impiegata in casi di studio reali e si conseguirono buoni risultati.

Nel 2004 fu utilizzato come base il modello di *Rouvel* (1972) a n-capacità termiche da parte di *Rouvel* e *Zimmermann* [38] suddividendo gli elementi della costruzione edilizia in base al carico: simmetrico per le superfici interne e asimmetrico per le pareti esterne. Così facendo si ottenne un modello RC con due capacità separate per le superfici non adiabatiche e adiabatiche. Il modello 7R2C di *Rouvel* e *Zimmermann* è stato inserito all'interno della normativa tedesca VDI 6007-1 del 2012 e la sua struttura è stata descritta nel capitolo precedente. Infine, l'ultima modellizzazione è stata proposta dalla norma internazionale ISO 13790 che considera un metodo di calcolo quasi stazionario e uno dinamico semplificato che si basa su un sistema a resistenze e capacità 5R1C di primo ordine. Tale norma è stata sostituita dalla norma ISO 52016 nel 2018, la quale fornisce un modello più dettagliato dell'edificio, oltre ad una valutazione del carico latente. Non si è preso in considerazione il modello di quest'ultima normativa in quanto più adatto ad una simulazione sul singolo edificio piuttosto che urbana, come ampiamente trattato nei capitoli precedenti.

Da alcune analisi eseguite su queste ultime due normative, si è evidenziato come il modello 7R2C fornisca un errore del carico termico giornaliero estivo minore rispetto al modello ad una capacità, mentre si ottengono risultati migliori quando si considera la richiesta di energia termica invernale con il modello 5R1C, pur mostrando errori maggiori sul carico giornaliero. Per queste analisi sono stati considerati come benchmark i risultati ottenuti dai modelli dettagliati dinamici sviluppati con il software di simulazione energetica EnergyPlus, così da poterne definire l'errore rispetto a tali valori.

Il codice di calcolo implementato in Python ed utilizzato per il seguente elaborato di tesi

magistrale, si basa sul modello a sette resistenze e due capacità termiche che fa riferimento alla normativa VDI 6007-1. Il programma di simulazione è stato costruito dai ricercatori dell'Università di Padova e in questo lavoro è stato aggiunto l'effetto dell'isola di calore e la quantificazione del calore di scarto per gli impianti ad aria degli edifici. Il flusso di lavoro del codice EUReCA e l'integrazione delle equazioni per la valutazione del fenomeno dell'isola di calore sono spiegati nei successivi paragrafi.

3.3 IL CODICE DI CALCOLO EUReCA

Il modello EUReCA (Energy Urban Resistance Capacitance Approach) è stato sviluppato nel corso degli anni dai ricercatori dell'Università di Padova e rappresenta un software per la modellizzazione urbana (UBEM) di tipo bottom-up. Il programma è un modello semplificato dinamico, poiché si utilizza una struttura lineare di risoluzione dei sistemi, grazie all'utilizzo del circuito elettrico equivalente precedentemente descritto. Così facendo si riducono significativamente i tempi richiesti per le simulazioni pur mantenendo un buon livello di accuratezza nel calcolo dell'energia richiesta dall'area urbana. L'ambiente di calcolo utilizzato è Python, in quanto grazie alla programmazione ad oggetti rende la programmazione più modulabile ed efficiente, rispetto a MATLAB. Lo scopo principale del software è di prevedere il fabbisogno energetico richiesto dagli edifici del distretto. All'interno del programma si trovano anche dei moduli addizionali che permettono la quantificazione della produzione da pannelli fotovoltaici, del calore latente richiesto dagli edifici e il fabbisogno energetico delle Unità di Trattamento Aria. Per eseguire le simulazioni degli edifici sono stati costruiti dei database in Excel riguardanti le stratigrafie delle strutture degli edifici (in funzione del periodo di costruzione dell'immobile) e le *schedules* dei carichi interni orari (es. presenza di persone ed illuminazione per i gironi feriali e festivi). Il codice importa inoltre il file georeferenziato che descrive le geometrie degli edifici, come descritto nel paragrafo 3.1.

Il programma è stato utilizzato con diversi casi di studio reali e ha mostrato buoni risultati rispetto ad altri programmi di modellizzazione dinamica dettagliata. Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato di aggiungere al software l'implementazione del codice di calcolo che valutasse l'effetto dell'isola di calore.

3.3.1 FLUSSO DI LAVORO

Il flusso di lavoro di un codice di calcolo rappresenta la sequenza con cui vengono eseguiti i passaggi. Nel caso di EUReCA ci sono tre fasi principali: la fase di pre-processing, la fase di simulazione ed infine la fase di post-processing. Per dare una visione generale della sequenza dei passaggi che si eseguono nel modello, è stato creato il seguente diagramma di flusso.

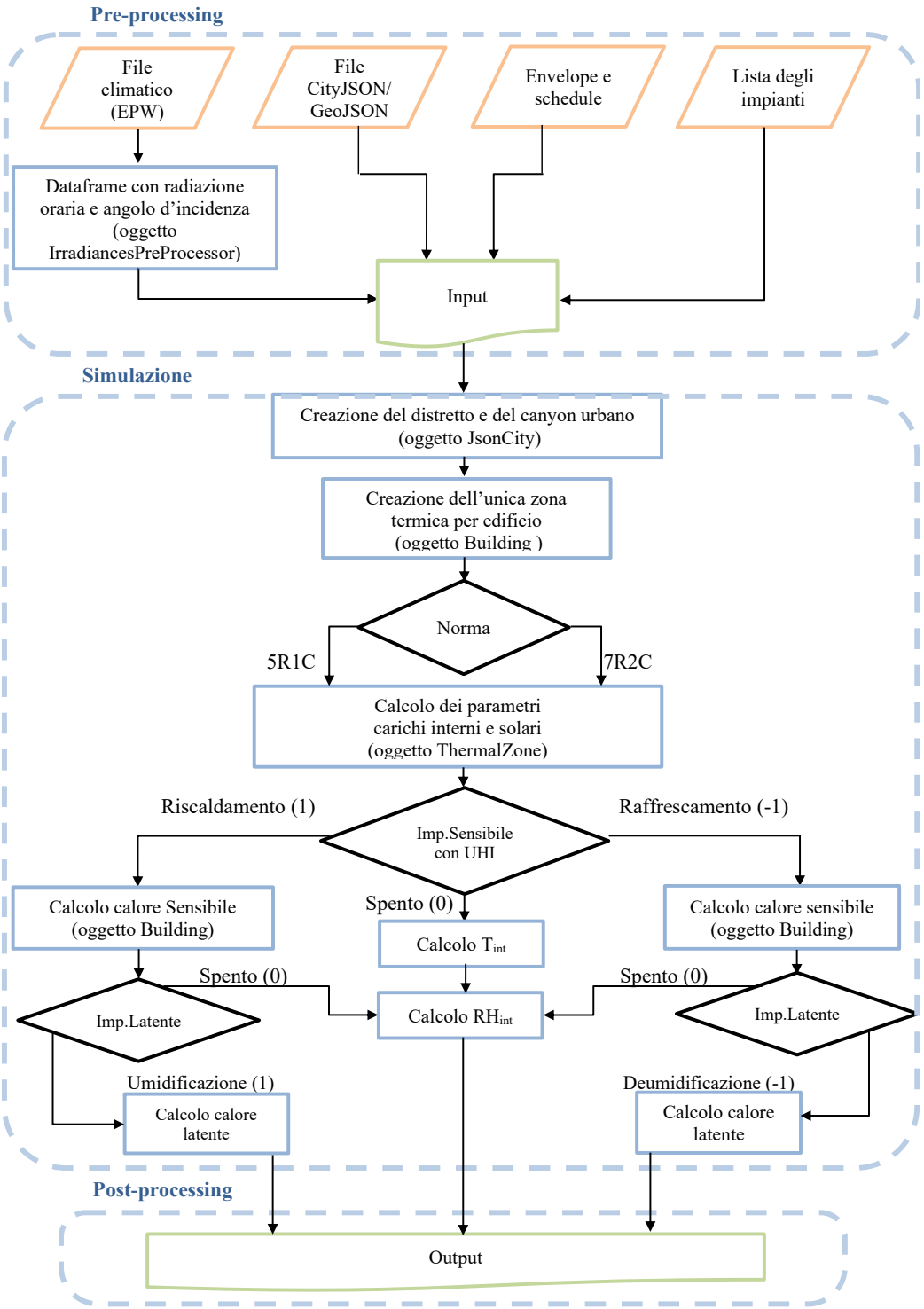


Figura 15: Flusso di lavoro EUReCA

3.3.2 DATI DI INPUT E ASSUNZIONI IN FASEDI PRE-PROCESSING

Dallo schema del workflow appena presentato si nota come il programma per funzionare necessiti di quattro diverse categorie di input, riguardanti: il file climatico del caso studio, la geometria 2D o 3D della città considerata, le caratteristiche termo-fisiche degli edifici e la lista degli impianti di riscaldamento e raffrescamento. Questa primo blocco del codice di calcolo assume molta importanza per una corretta simulazione, in quanto se si considerano dati iniziali sbagliati o che differiscono molto dal caso studio reale, non si potranno ottenere delle corrette modellizzazioni dell'area urbana. Tale attenzione deve essere posta anche, per esempio, nella scelta del file climatico EPW da associare alla simulazione. Questi documenti solitamente derivano dalle raccolte di dati degli aeroporti, che sono siti localizzati in periferia e non circondati dall'urbanizzazione, sicché non risultano essere condizionati da microclimi specifici di alcune aree urbane o dalla presenza di grandi superfici d'acqua.

Questa prima fase del programma EUReCA è definita come fase di pre-processing, in quanto si eseguono tutti quei caricamenti e assunzioni, necessari al software per poi poter eseguire la simulazione dinamica del distretto. Tutti i quattro file di input che sono stati precedentemente elencati sono stati raggruppati all'interno della directory *Input.* Per permettere l'utilizzo di vettori o matrici e le rispettive risoluzioni di tali sistemi è stata importata la libreria *Numpy*, in quanto non sono presenti di default tali operazioni, a differenza di altri linguaggi, come Matlab. Infine, sono state importate altre librerie come *Os, Pvlib* e *Pandas* che hanno rispettivamente la funzione di:

- designare il percorso all'interno di una generica cartella per ottenere il file necessario indipendentemente dal sistema operativo del computer utilizzato dall'utente;
- leggere e decifrare il file EPW, contenente i dati climatici del sito;
- maneggiare e gestire i file con dominio *.csv.*

Il programma completo viene eseguito tramite il file *Main_Belzoni_EB.* All'inizio del documento, prima della vera fase di caricamento dei dati di input del pre-processing, si trovano le assunzioni iniziali per le simulazioni. Questi valori possono essere cambianti da simulazione a simulazione. L'utente può quindi agire sui seguenti parametri:

- *(azSubdiv)* il numero di intervalli in cui suddividere i valori dell'azimut solare (da -180° a 180°) e dell'inclinazione della superficie, (*hSubdiv),* colpita dal raggio solare (da 0° a 90°); di default scelti rispettivamente di 8 e 3 intervalli
- *(ts)* il time step; di default scelto pari a 1 ora

- *(model)*, permette la scelta di simulazione tramite un modello 1C (una capacità) o 2C (due capacità) e tramite *(mode)* se utilizzare la modalità GeoJSON o CityJSON in base al modello disponibile per il proprio caso studio
- se eseguire dei modelli precisi all'interno del programma o se bypassare tali processi come, il fattore di ombreggiamento tra gli edifici (*shading_effect*), il calcolo dei giorni di design (*DesignDays_calc),* il calcolo dei consumi degli impianti di condizionamento degli edifici (*Plant_calc*) e il calcolo dell'effetto dell'isola di calore (*UWG_calc*)

Per concludere la sezione del *Main_Belzoni_EB* riguardante le assunzioni di pre-processing, si trovano i valori geometrici, fisici e statistici per definire il canyon cittadino, gli strati di materiali del suolo e della strada e i valori per il traffico urbano, necessari per calcolare UHI.

Il primo input ad essere importato nel programma è il documento dei dati climatici in formato EPW, che risulta molto comune tra i software di simulazione per gli edifici e soprattutto disponibile per numerose città del mondo. È un file *csv* che può essere letto in Excel e contiene tutte le informazioni climatiche su base oraria, come la temperatura di bulbo secco e bagnato, l'umidità relativa, la velocità del vento, la radiazione su superficie orizzontale diretta e globale e la latitudine e longitudine del sito in questione. Nel caso di EUReCA tutte le simulazioni sono state eseguite considerando le condizioni esterne di Legnaro (Padova), fornite gentilmente dal ARPAV. In tabella sono stati riassunti gli input principali per la zona urbana di Padova.

Tabella 4: Dati di input del caso studio

Parametri EUReCA	
Luogo	Padova
Latitudine	45.35°
Longitudine	11.96°
Diametro della città	800 m
Area della città	538000 m^2
Altezza media degli edifici	10.04 m
Densità orizzontale degli edifici	0.32
Rapporto tra la superficie verticale esterna degli edifici e l'area del sito urbano	1.22
Densità orizzontale della vegetazione	0.24

Dopo aver estratto le variabili elencate, si è determinata la temperatura apparente media

della volta celeste tramite un modello presente nello script *WeatherData.*

Successivamente viene determinato l'angolo di incidenza della radiazione diretta per ogni finestra e inserita all'interno di un *dataframe*. Un *dataframe* è una tabella di dati indicizzata da righe e colonne in grado di contenere diverse tipologie di dati. La suddivisione di ciascun elemento avviene quindi in base al nome delle chiavi, associate ad ogni colonna e non in base alla posizione del numero di riga e di colonna a cui appartiene un determinato dato. Il calcolo viene eseguito all'interno della classe *IrradiancePreProcessor* così da poter definire l'irradianza solare incidente sulle superfici vetrate nelle diverse ore della giornata. Per essere inizializzata tale classe necessita della latitudine e longitudine, della suddivisione dell'angolo di tilt e azimut e della radiazione diretta e globale, recuperabili dal file EPW. Dopodiché utilizzando una funzione implementata in *Pvlib* è possibile definire il valore dell'irradianza [W/m^2] per ogni specifica superficie. Per esempio, per determinare l'irradianza totale incidente sulla superficie stradale, al mezzogiorno solare, è sufficiente impostare le tre indicazioni di azimut, altezza e componente desiderata, come per l'irradianza globale orizzontale: 0.0, 0.0, "global". Il carico solare influisce molto sulla richiesta di raffrescamento dell'edificio, per calcolarlo viene utilizzato l'angolo di incidenza tra raggi solari e superfici vetrate per correggere il coefficiente del carico solare (SHGC) di ogni finestra. Nella figura sottostante è stato riportato un estratto del *dataframe* dell'irradianza in funzione dell'angolo d'incidenza e della componente solare.

Index 0	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Azimuth	-180.0	-180.0	-180.0	-180.0	-180.0	-180.0	-180.0	-180.0	-180.0
Height	30.0	30.0	30.0	60.0	60.0	60.0	90.0	90.0	90.0
Component	AOI	direct	global	AOI	direct	global	AOI	direct	global
2020-01-01 00:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	0	0
2020-01-01 01:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	0	0
2020-01-01 02:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	0	0
2020-01-01 03:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	0	0
2020-01-01 04:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	0	0
2020-01-01 05:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	-0	0
2020-01-01 06:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	-0	0
2020-01-01 07:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	-0	0
2020-01-01 08:00:00+01:00	90	-0	8.54784	90	-0	7.3125	90	-0	5.625
2020-01-01 09:00:00+01:00	90	0	37.0574	90	0	31.75	90	0	24.5
2020-01-01 10:00:00+01:00	90	0	72.2152	90	0	61.875	90	0	47.75
2020-01-01 11:00:00+01:00	90	0	79.7965	90	0	68.3125	90	0	52.625
2020-01-01 12:00:00+01:00	90	0	85.4951	90	0	73.1875	90	0	56.375
2020-01-01 13:00:00+01:00	90	0	107.356	90	0	91.9375	90	0	70.875
2020-01-01 14:00:00+01:00	90	0	89.3109	90	0	76.5	90	0	59
2020-01-01 15:00:00+01:00	90	0	42.7392	90	0	36.5625	90	0	28.125
2020-01-01 16:00:00+01:00	90	-0	4.7488	90	-0	4.0625	90	-0	3.125
2020-01-01 17:00:00+01:00	90	-0	0	90	-0	0	90	-0	0

Figura 16:Dataframe irradianza in funzione dell'angolo d'incidenza e della componente [W/m^2] – Fonte EUReCA

La seconda categoria di input necessari al codice di calcolo riguarda la geometria e la costruzione della città attraverso l'utilizzo del file CityJSON o GeoJSON. Tali formati di dati georeferenziati della città permettono di considerare un gran numero di edifici con i propri attributi. L'importanza accennata precedentemente, per la corretta identificazione e assunzione dei dati iniziali, risulta rilevante anche in questa categoria e quindi prima di procedere ad una valutazione dell'energia richiesta dagli edifici è consigliato prestare attenzione alla fase di pre-processing. All'interno della cartella *Input* si trova il sistema georeferenziato necessario all'utente. Il documento caricato nel codice di calcolo grazie alla libreria *Os* è un file di tipo CityJSON e quindi presenta già un formato tridimensionale della città. Nel caso in cui quest'ultimo non sia disponibile, sono state implementate all'interno della classe *JsonCity* delle linee di codice che, partendo da dati 2D e attribuendo alle piante degli edifici un'altezza, permettono di creare un distretto 3D. La simulazione per questo lavoro di tesi magistrale riguarda un caso studio costituito da più di 500 edifici ed è chiaro che risulta impossibile avere dei modelli dettagliati per ciascuno di essi, così sono stati utilizzati degli archetipi per andare a definire le proprietà termofisiche in base all'anno di costruzione dell'immobile. Pertanto, all'interno del file CityJSON si trovano le informazioni riguardanti ciascun edificio come: anno di costruzione, destinazione d'uso, tipologia di impianto di condizionamento.

I dati dell'involucro edilizio si trovano all'interno di un file Excel dedicato e tramite la funzione *loadEnvelopes*, presente nel *Main_Belzoni_EB*, vengono caricati nel codice.

Name	Type	Size	Value	Callable	Path
1930-1945	Envelope.Envelope	1	Envelope object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945
ExtWall	Envelope.OpaqueStratigraphy	1	OpaqueStratigraphy object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.ExtWall
GroundFloor	Envelope.OpaqueStratigraphy	1	OpaqueStratigraphy object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.GroundFloor
IntCeiling	Envelope.OpaqueStratigraphy	1	OpaqueStratigraphy object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.IntCeiling
IntFloor	Envelope.OpaqueStratigraphy	1	OpaqueStratigraphy object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.IntFloor
IntWall	Envelope.OpaqueStratigraphy	1	OpaqueStratigraphy object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.IntWall
Roof	Envelope.OpaqueStratigraphy	1	OpaqueStratigraphy object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.Roof
Window	Envelope.Window	1	Window object of RC_classes.Envelope module	False	1930-1945.Window
id	Index	(8,)	Index: 8 entries, name to Window	False	1930-1945.id
name	str	1	1930-1945	False	1930-1945.name

Figura 17: Dizionario degli envelope - Fonte EUReCA

Un approccio simile viene eseguito per i carichi interni degli edifici come la presenza delle persone e delle apparecchiature elettriche, le portate di vapore e l'impianto di illuminazione, i quali sono descritti in un ulteriore foglio di calcolo. In esso sono presenti quattro fogli per le diverse tipologie di edificio (residenziale, terziario, servizi, commerciale) e sono riportati i valori assoluti di ogni parametro con le rispettive percentuali d'uso in funzione dell'ora e dei giorni feriali o festivi. Gli apporti gratuiti dei flussi termici sensibili e latenti sono definiti in [W], mentre la portata di vapore in [kg_v/s]. Tutti questi parametri sono stati calcolati seguendo le norme ISO 18523 e EN16798-1 [39,40].

Infine, l'ultimo dato di input che deve esser caricato all'interno dello script principale per l'esecuzione del codice di calcolo, riguarda gli impianti di condizionamento di ogni edificio. Il caricamento dei valori preimpostati di alcuni parametri come il rendimento nominale delle caldaie a condensazione e tradizionali o il coefficiente EER per i chiller e i condizionatori sono stati scritti nel file Excel *PlantList.* Il documento viene caricato nel *main* tramite il modulo *loadPlants* creando così un dizionario, con le rispettive chiavi per le diverse tipologie di impianti.

3.3.3 UNIONE TRA IL MODELLO EUReCA E IL MODELLO DEL UHI

L'obiettivo della tesi magistrale è l'implementazione di un codice di calcolo che riesca a determinare e quantificare l'effetto dell'isola di calore per un'area urbana. Come accennato nei capitoli precedenti, si ha la comparsa di tale fenomeno soprattutto nel periodo estivo in cui la radiazione solare giornaliera è più alta e gli impianti di raffrescamento ad aria si accendono rilasciando nel canyon cittadino calore sensibile, con un conseguente aumento della temperatura esterna. Per la valutazione dell'UHI si è seguito come base il programma (Urban Weather Generator) di Bueno [21], modificando alcuni passaggi per renderlo più efficiente e adatto al modello EUReCA. La differenza sostanziale tra il metodo di Bueno e il codice implementato in questo lavoro di tesi, riguarda la struttura e l'idea che sta dietro i due modelli. Nel caso di Bueno si ha un modello computazionale stand-alone che fornisce un file EPW modificato come output e che può essere utilizzato all'interno di programmi esistenti di simulazione energetica (e.g. EnergyPlus). In questo elaborato, invece, si è dovuto ricalcare e seguire il linguaggio Python con cui era già stato scritto la gran parte del modello BEM. In questo modo per ogni time step viene calcolata come output principale la temperatura esterna modificata del centro urbano, così da eseguire la simulazione energetica tenendo conto di questo valore.

All'interno dello script *Climate_rev_v1* sono presenti le linee di codice per quantificare l'effetto dell'isola di calore. Il file è suddiviso in tre classi: una per la strada, una per il suolo e una per il canyon urbano. Questa scelta è stata possibile grazie alla struttura ad oggetti del programma Python che permette di creare facilmente oggetti (classi) che vengono eseguiti e richiamati solo se necessari all'interno delle linee di codice tramite delle funzioni (metodi).

In questo paragrafo non sono riportate tutte le equazioni utilizzate nel codice, poiché sono state largamente spiegate all'interno del paragrafo 2.1, ma verrà analizzata e spiegata la struttura del codice.

La prima classe riguarda l'oggetto strada che ha lo scopo di calcolare la temperatura oraria

superficiale del manto stradale T_r [°C], che rappresenta un dato di input per ottenere la temperatura esterna. Ogni classe nel linguaggio di Python deve essere inizializzata prima di procedere all'effettiva scrittura del sistema di equazioni, sicché in questo caso il metodo di inizializzazione necessita:

- del tempo di simulazione (*sim_time*);
- delle caratteristiche del terreno, quali la capacità termica [J/(m3*K)] e la profondità [m], collocati all'interno di una matrice (suolo);
- delle caratteristiche della strada, quali la capacità termica [J/(m3*K)] e la profondità [m] per ogni materiale costituente, raggruppati all'interno della matrice (strada);
- delle temperature ipotizzate all'istante zero (τ=0) per i diversi strati in cui è costituito il pacchetto stradale [°C];
- del coefficiente di scambio radiativo con la volta celeste [W/m^2*K].

A queste variabili sono state aggiunte come costanti i coefficienti di assorbimento e di riflessione della superficie stradale, che vengono modificati nel capitolo successivo, per valutare come cambia la temperatura del distretto agendo su questo parametro. Successivamente alla prima fase di inizializzazione, si ha il metodo *solve_road* che calcola le temperature per ogni layer in cui è stato suddiviso il pacchetto stradale, utilizzando le equazioni 1,2 e 3. Infine, l'ultimo metodo della classe, *update_temp_r*, esegue la sostituzione dei valori all'istante *i-1* con i valori all'istante *i* per le temperature dei rispettivi layer.

La seconda classe riguarda il suolo e presenta gli stessi tre metodi elencati per il caso della strada, *__init__* (inizializzazione)*, solve_soil e update_temp*. Rispetto all'oggetto strada variano i valori delle caratteristiche termico fisiche dei materiali, che costituiscono il terreno nella zona rurale, e le variabili esterne alla classe come la radiazione, la temperatura dell'aria e del cielo, il tempo di simulazione e il coefficiente di convezione, che derivano dal file climatico EPW e dalla risoluzione di metodi presenti in altri script.

L'ultima classe riguardante il distretto urbano definisce la temperatura esterna del canyon cittadino in presenza dell'effetto dell'isola di calore. Prima del metodo di inizializzazione per tale oggetto, sono state scritte le assunzioni per le seguenti variabili all'istante iniziale:

- $H_{urb_0} = 10\ \frac{W}{m^2}$
- $T_{urb_0} = 24\ °C$
- $T_{boundary_0} = 18°C$

L'assunzione di tali valori risulta essere fondamentale per poter risolvere il sistema di

equazioni. Come per le due classi precedenti anche in questo caso va inizializzato l'oggetto *UrbanCanyon*, tramite le due variabili di input richieste:

- tempo di simulazione (*sim_time*);
- dati di input contenenti le dimensioni geometriche del canyon, le percentuali di densità degli edifici e delle zone verdi e lo spessore dello strato UBL (Urban Boundary Layer) che sono contenuti all'interno di un dizionario.

All'interno del dizionario sono presenti anche altri valori di input che sono utilizzati nel metodo di risoluzione del *UrbanCanyon* come:

- le matrici contenenti lo spessore, la capacità termica e la temperatura ipotizzata per ogni strato di materiale del suolo e della strada;
- il numero di autoveicoli per mille abitanti, le emissioni dei veicoli e le schedule del traffico nei giorni feriali e festivi.

Ritornando all'interno dello script *Climate_rev_v1*, si trovano le ultime voci presenti nell'inizializzazione della classe *UrbanCanyon* che richiamano i rispettivi metodi *__init__* delle classi strada e suolo, scritte precedentemente, e il calcolo del calore ceduto dai veicoli, *H_traffic* [W], grazie all'equazione 43 moltiplicata per l'area della città.

Una volta che la classe è stata inizializzata e tutti i parametri sono stati definiti, è possibile iniziare la risoluzione del sistema di equazioni tramite il metodo *solve_canyon*. L'obiettivo finale di questo metodo è di definire la nuova temperatura nell'area urbana a partire dalla temperatura iniziale presente nel file EPW per la zona rurale. Per farlo è necessario assegnare le variabili esterne alla classe *UrbanCanyon*, ovvero variabili che sono state definite all'interno di metodi non presenti nel seguente oggetto:

- tempo di simulazione (*t*);
- temperatura dell'aria, velocità del vento e irradianza solare del EPW (*T_air_rural* [K], *u_atm_input* [m/s], *radiation* [W/m^2]);
- temperatura delle pareti esterne degli edifici (*T_w* [K]);
- temperatura della volta celeste (*T_sky* [K]);
- calore rilasciato dagli impianti di condizionamento ad aria (*H_waste* [W]);
- zenith solare (*lamda_zenith* [rad]);
- temperatura e portata di aria delle ex-filtrazioni dagli edifici (*T_exf* [K], *V_exf* [m^3/s]).

Per il calcolo orario della temperatura *T_urb* [°C] è stato implementato un ciclo per ogni intervallo di simulazione. Al ciclo si è posto un controllo sul calore rilasciato dall'area urbana *H_urb* [W/m^2], impostando una tolleranza massima tra il valore ipotizzato e quello calcolato. Posto tale primo controllo, si è deciso di implementare delle linee di codice che andassero a definire una nuova velocità del vento che fosse sempre maggiore di zero, per evitare problemi di divergenza all'interno del codice. Così si è scelto di imporre il valore di 0.1 m/s, in tutti i casi in cui la velocità fosse minore di tale limite.

Successivamente a questi due controlli vengono eseguiti i passaggi e le equazioni spiegati nel paragrafo 2.1 per i quattro moduli accoppiati (RSM, VDM, UBL, UC), così da definire ad ogni ora la *T_urb*, che viene utilizzata per quantificare il fabbisogno energetico degli edifici in quell'istante. Una volta calcolati tutti i fabbisogni energetici all'istante i-esimo, si passa all'istante successivo calcolando la nuova *T_urb* per poi definire le richieste energetiche degli edifici in quell'ora. Così facendo si crea un effetto a cascata per ogni istante di simulazione, risolvendo prima il calcolo del UHI e poi andando a utilizzare questo output come input per la simulazione energetica al posto della temperatura esterna suggerita dal file climatico.

Nel codice di calcolo oltre alle equazioni si trovano le classi del Suolo e della Strada con i rispettivi metodi di risoluzione, *solve_soil* e *solve_road* per richiamare le temperature del suolo e della superficie stradale, necessarie per il calcolo di *H_rur* e *T_urb*. Infine, una volta calcolati la temperatura *T_urb* e il flusso convettivo uscente dal canyon verso l'Urban Boundary Layer *H_urb,* vengono memorizzati per il successivo ciclo e aggiornati ad ogni time step.

Il metodo che crea il canyon urbano utilizza le superfici esterne degli edifici per calcolare l'area totale di pareti opache e trasparenti presenti in tutta l'area urbana. Questi parametri sono necessari, in quanto rappresentano gli input della classe *UrbanCanyon* precedentemente descritta, così come la densità degli edifici, l'altezza media degli edifici e il rapporto tra la superficie totale delle pareti esterne rispetto all'area della cittadina.

3.3.4 SIMULAZIONE ENERGETICA

La fase nevralgica dei programmi di modellizzazione energetica è la simulazione, in quanto permette di quantificare quanta energia richiede ciascun immobile e perciò risulta essere anche la fase nella quale si ha il maggior sforzo computazione e di archiviazione dei dati. Difatti, considerando il seguente caso con più di 500 edifici, si richiede mediamente un tempo superiore ai sessanta minuti per il termine della simulazione, utilizzando un computer portatile a disco fisso con una RAM non performante. Tuttavia, va ricordato che per una mole di dati di queste

proporzioni il tempo di attesa risulta essere di gran lunga migliore e gestibile, se paragonato a programmi che si basano su metodi dinamici dettagliati. Come evidenziato dallo schema del flusso di lavoro (*fig. 15),* la fase di simulazione è successiva al pre-processing, perciò è chiaro come una accurata analisi e una buona qualità dei dati iniziali abbia un peso elevato sull'accuratezza degli output finali.

Il centro della simulazione di EUReCA avviene nello script *CityJSON*. La simulazione viene richiamata all'interno nel documento *Main_Belzoni_EB* tramite il metodo *citysim*, il quale permette di risolvere il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici per ogni singolo time step. Il metodo necessita della definizione delle seguenti variabili:

- tempo totale di simulazione (*sim_time*);
- temperatura e umidità esterna, velocità del vento caricati dal file climatico EPW (*T_ext, RH_ext, w*);
- carichi solari (*Solar_Gains*) e posizione del sole (*Solar_position*);
- temperatura della volta celeste (*T_sky*);
- numero di time step per ora, impostato di default pari a 1 (*ts*);
- lista degli impianti di condizionamento, se presenti (*Plant_list*).

Una volta che sono state assegnate tali variabili esterne alla classe, è possibile proseguire con la simulazione della modellizzazione energetica dell'area urbana, la quale prevede in prima battuta la modifica della temperatura esterna proposta dal file climatico nella temperatura del distretto urbano per effetto dell'isola di calore. La modifica avviene grazie al metodo *solve_canyon* implementato all'interno dello script *Climate_rev_v1*, che permette di valutare come il fabbisogno energetico degli edifici vari, tenendo conto di questo fenomeno. Per ottenere le richieste energetiche degli edifici viene richiamato sempre in *citysim*, il metodo *solve* della classe *Building,* collegato alle funzioni presenti nella classe *ThermalZone*. I metodi *solveTZ, Sensible1C* e *Sensible2C* eseguiti rispettivamente in quest'ordine, permettono di definire la richiesta termica sensibile e latente, nella stagione di riscaldamento e raffrescamento di ciascun edificio, in base alla normativa ISO 13790 (5R1C) o alla normativa tedesca VDI 6007-1 (7R2C).

Il diagramma di flusso della simulazione energetica nel codice di calcolo, partendo dallo script principale fino al calcolo dell'ultimo parametro del circuito RC, è rappresentato nella figura sottostante, dividendo le classi (arancione) dai metodi principali (blu).

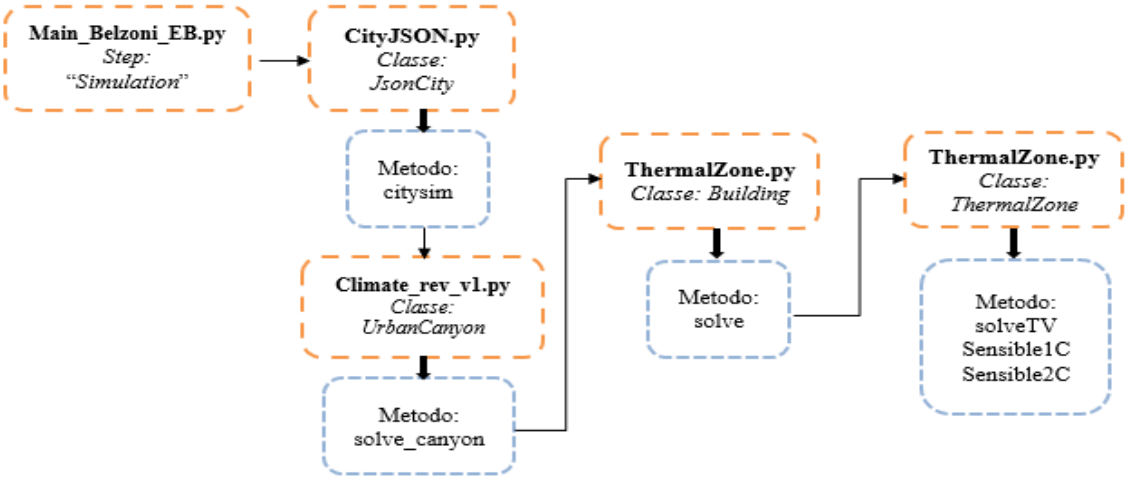


Figura 18: Schema riassuntivo dei passaggi per la simulazione energetica

CAPITOLO 4

4.1 ANALISI DEI RISULTATI

Il modello implementato in questo lavoro di Tesi Magistrale è stato utilizzato per quantificare l'effetto dell'isola di calore sulla temperatura del centro urbano e la variazione che ciò comporta sui consumi energetici degli edifici. Nei capitoli precedenti sono stati presentati i modelli, le equazioni e le assunzioni seguite per le diverse simulazioni, mentre in questo capitolo sono presentati, analizzati e comparati i risultati ottenuti, al fine di dare una panoramica completa dell'effetto UHI per il caso studio di Padova e validare il modello che ne tiene conto sulla piattafroma EUReCA. La validazione è confermata tramite il confronto con i dati ottenuti dalle simulazioni del *Urban Weather Generator* di Bueno [19], pur considerando un errore relativo, legato al fatto che i modelli sono stati scritti diversamente e presentano differenti assunzioni. Nei paragrafi successivi a questa prima fase di rappresentazione dei risultati, sono mostrati gli effetti dovuti alla variazione di alcuni parametri rilevanti per il calcolo dell'isola di calore, come la densità di vegetazione, il traffico urbano, il calore di scarto dagli impianti di condizionamento, l'efficenza degli impianti di condizionamento e il coefficiente di riflessione delle superfici degli edifici e della strada.

Le variabili della simulazione del modello EUReCA necessarie ad un'accurata analisi tecnica del UHI, sono state raggruppate all'interno di file *.csv* così da rendere più agevole la visualizzazione. Gli output necessari per evidenziare e rappresentare la presenza dell'isola di calore nell'area urbana rispetto alla zona rurale sono stati identificati nei seguenti parametri:

- Temperatura media oraria dell'aria ambiente, *T_urb* [°C];
- Energia elettrica richiesta dagli edifici, *Electrical_energy_consumption* [kWh];
- Consumo di gas naturale degli edifici, *Gas_consumption* [Nm^3];
- Energia primaria, *Primary_energy_demand* [tep];

Le temperature di bulbo secco giornaliere sono utilizzate per analizzare come la UHI cambi le temperature diurne per le stagioni di riscaldamento e raffreddamento, mentre l'effetto di riscaldamento è valutato in base alla differenza di temperatura tra il valore urbano e il sito di riferimento rurale, confrontando le temperature medie di bulbo secco per ogni ora in un mese. Come si evince dai successivi grafici e tabelle, è stato riscontrato un globale aumento della temperatura esterna nel canyon, con un aumento dei consumi di energia elettrica in estate accompagnato però, da una riduzione di consumo di gas nella stagione invernale, seppur

minima.

L'energia richiesta dagli edifici sottoforma di energia elettrica nella stagione estiva e di consumo di gas nella stagione invernale cambia a causa del UHI. Tali variazioni sono visibili per il seguente caso studio in quanto si ha un'alta presenza di edifici residenziali (94%) rispetto a edifici commerciali. Quest'ultimi sono maggiormente dominati dai carichi interni e quindi meno influenzati dall'ambiente esterno e dall'effetto dell'isola di calore.

I precedenti parametri sono stati scelti perché le performance energetiche hanno un impatto sulla temperatura esterna, attraverso il calore di scarto rilasciato dagli impianti di condizionamento ad aria.

Ciascun risultato della simulazione è stato valutato confrontandolo con il caso base, che utilizza il file climatico *EPW* per le simulazioni, così da valutare l'impatto della temperatura e dell'energia utilizzata.

Iniziando con l'analisi termica, si sono suddivise le 8760 ore di simulazione nei dodici mesi, così da poter definire la temperatura media, minima e massima per ogni mese. Nelle tabelle sottostanti sono riportati tali valori, rispettivamente nei casi senza e con effetto dell'isola di calore.

Tabella 5: Temperatura massima, minima e media senza UHI

Mese		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.5	21.2	23.2	22.5	27.2	37.3	34.6	32.6	30.0	24.1	19.4	14.8
T_{MIN}	[°C]	-5.3	-1.4	0.4	6.4	6.7	15.9	13.9	14.8	9.6	7.0	3.5	-2.6
T_{MEDIA}	[°C]	2.3	6.2	10.1	13.1	14.9	25.2	24.5	24.5	19.5	15.4	10.6	5.8

Tabella 6: Temperatura massima, minima e media con UHI

Mese		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.6	22.4	24.2	24.1	29.1	39.0	36.7	34.5	33.7	25.4	19.7	14.8
T_{MIN}	[°C]	-4.3	-1.2	1.1	6.7	6.8	17.0	16.1	15.2	10.9	7.3	3.8	-2.3
T_{MEDIA}	[°C]	2.7	6.7	10.9	13.9	15.7	26.6	25.9	25.8	20.3	16.0	10.7	6.0

Come si nota da questa prima visualizzazione si ha una temperatura media più alta di qualche decimo di grado nei mesi più freddi (gennaio, febbraio, ottobre, novembre, dicembre) mentre si ha un effetto maggiore di 1°C nei mesi estivi (giugno, luglio, agosto). Questo andamento è stato evidenziato nel successivo grafico in cui si mostra la differenzia media tra la *T_urb* calcolata dal modello e la temperatura definita dal file climatico.

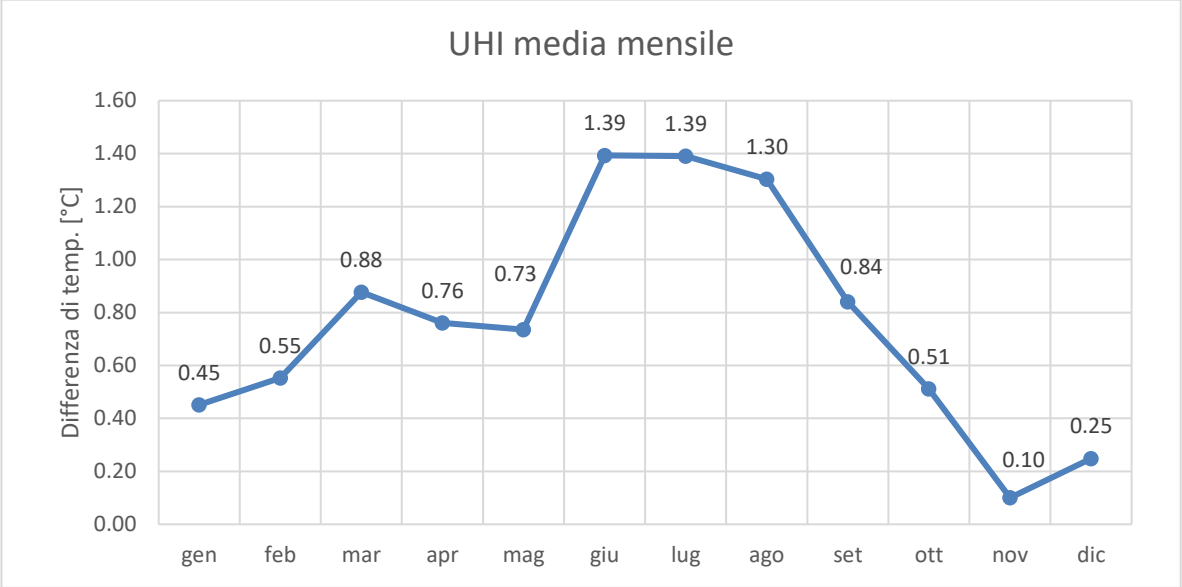


Figura 18:Grafico dell'andamento medio mensile del UHI

La presenza dell'isola di calore risulta essere più marcata nel periodo estivo, comportando una differenza media di temperatura di 1.39°C dovuta principalmente alle seguenti cause:

- Aumento della radiazione solare e quindi maggior assorbimento delle onde corte da parte delle pareti esterne degli edifici e della superficie stradale, con conseguente aumento della temperatura superficiale per tali materiali;
- Accensione degli impianti di raffrescamento ad aria e quindi aumento rilevante del calore espulso dai condensatori.

Dopo aver fatto un'analisi mensile si è valutato il comportamento in maniera più generale a livello stagionale per l'estate e l'inverno e su tutto l'arco annuale. Quel che si è notato è che nel periodo estivo l'isola di calore comporta un aumento medio della temperatura più che triplo rispetto alla stagione più fredda. Ciò causa un aumento maggiore dei consumi energetici per il raffrescamento a discapito del risparmio energetico del riscaldamento invernale. Si è calcolato infine, un aumento medio della temperatura nel corso dell'anno di 0.77°C.

Evidenziando il comportamento giornaliero per l'estate e l'inverno sono stati scelti, a titolo d'esempio, i due giorni del solstizio delle due stagioni. I risultati sono stati rappresentati rispettivamente nei seguenti grafici e comparati alla temperatura del caso base.

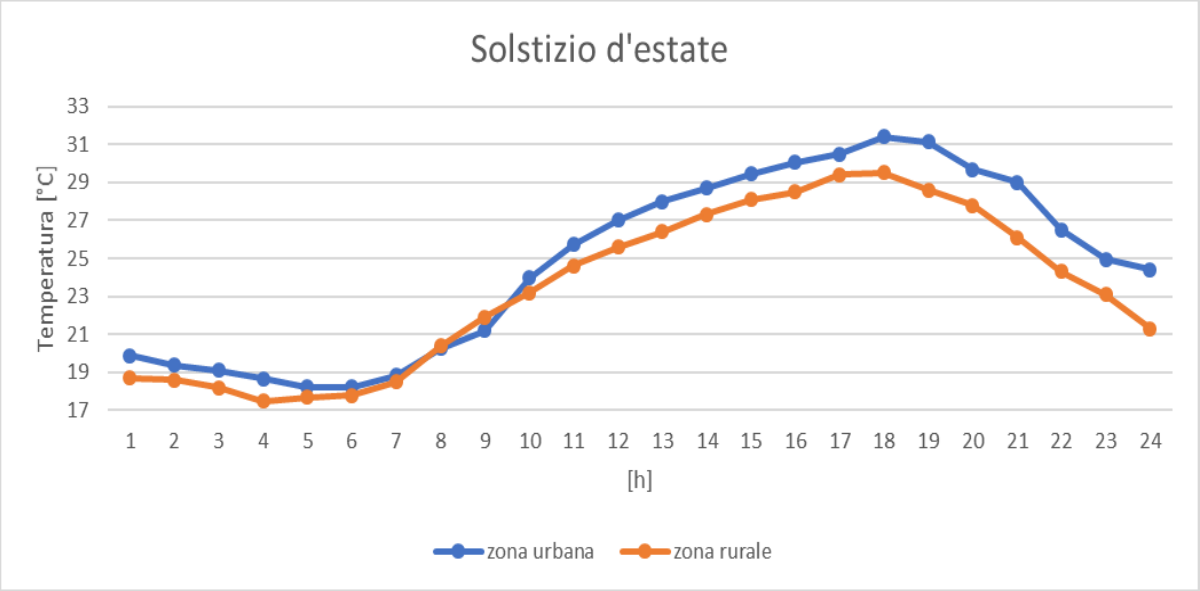


Figura 19: Grafico giornaliero della temperatura nella zona urbana e rurale

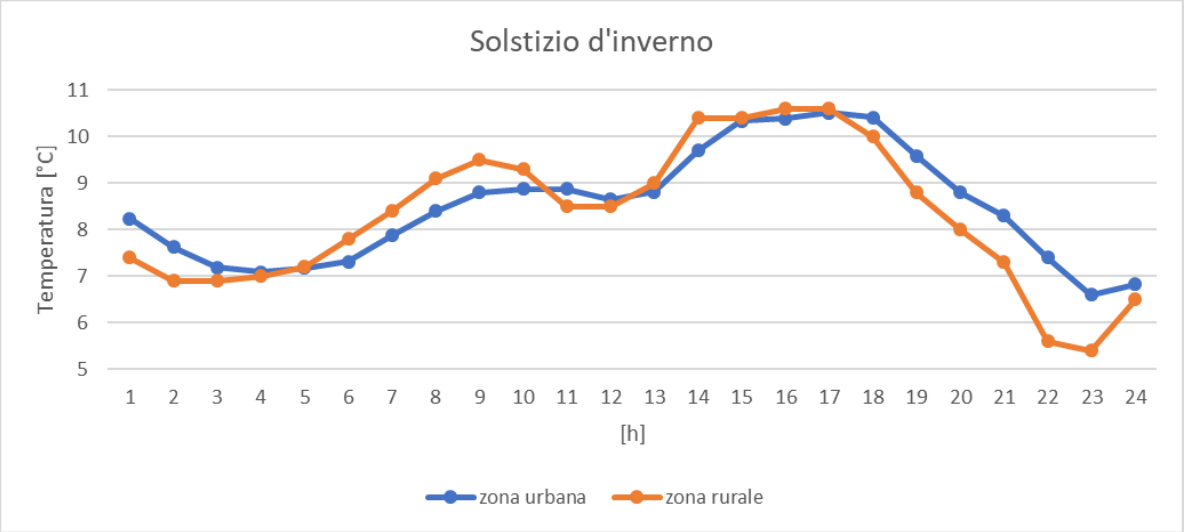


Figura 20: Grafico giornaliero della temperatura nella zona urbana e rurale

L'effetto dell'isola di calore risulta essere più marcato nel caso estivo, per le ragioni spiegate precedentemente data dal massimo effetto per entrambi i giorni, presente nelle ore serali dalle 19.00 fino alle 24:00. Questo risultato si spiega dal fatto che la città è composta da molti materiali che presentano un alto coefficiente di assorbimento, come l'asfalto e le pareti esterne degli edifici, che causano una minore riduzione della temperatura rispetto alle zone di campagna, con una maggiore densità di vegetazione.

Tale effetto è seguito sempre dal raffrescamento dell'aria esterna fino alle prime ore del mattino, formando in alcuni casi anche la UCI (Urban Cooling Island). Questo fenomeno è visibile nel corso della giornata del solstizio d'inverno (*fig.20*), nella quale si ha un maggiore raffreddamento della città rispetto alla campagna.

Queste considerazioni sono ancor più visibili e confermate se si analizza la differenza media oraria della temperatura nel corso di un mese intero e non solo di una singola giornata. Prendendo in considerazione il mese di giugno e di dicembre si sono ottenuti i seguenti andamenti, che seguono le analisi giornaliere precedentemente spiegate. Difatti nelle ore serali e quindi con l'assenza della radiazione solare, si manifesta la maggior differenza tra il sito in questione e la zona rurale.

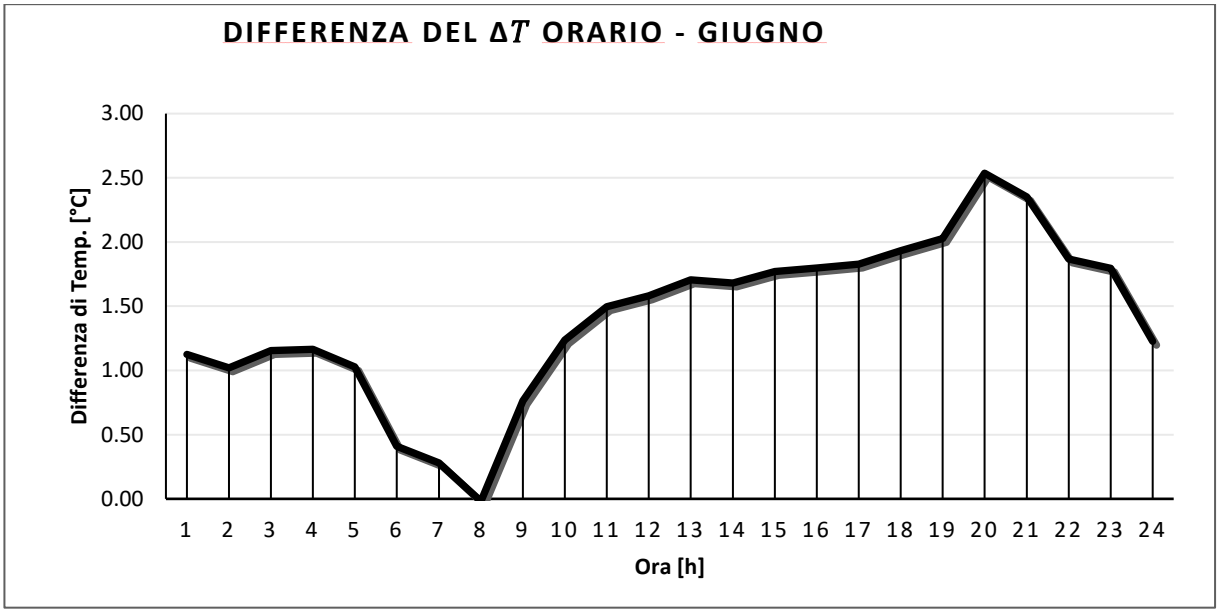


Figura 21: Differenza della temperatura media oraria di giugno

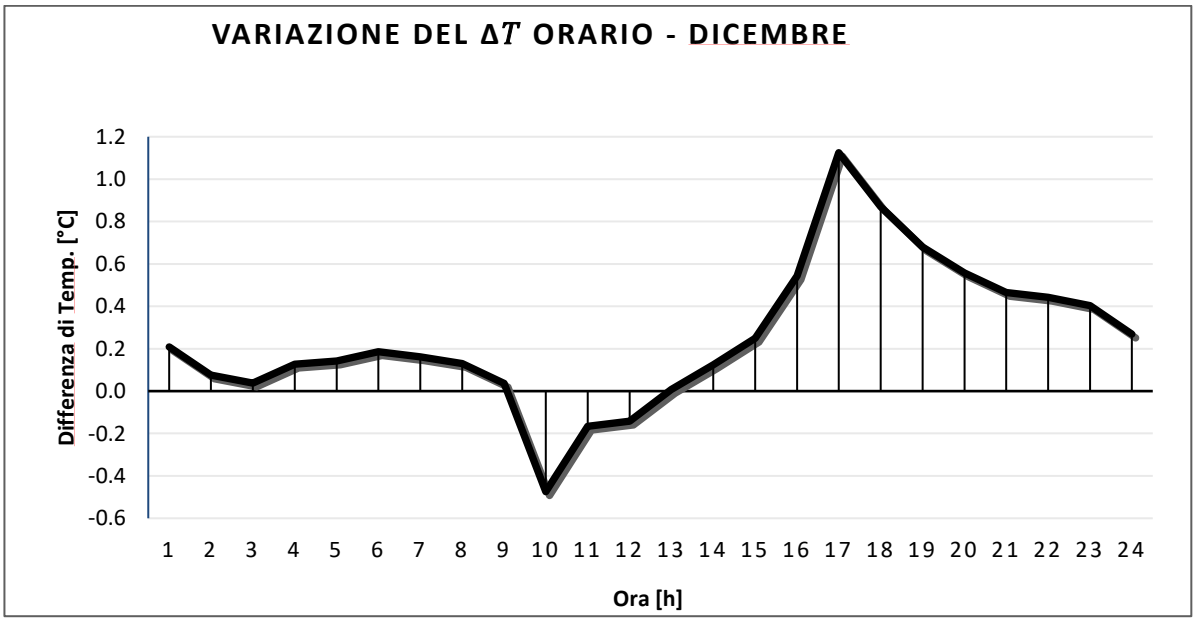


Figura 22: Differenza della temperatura media oraria di dicembre

Col trascorrere della notte la T_{urb} si avvicina sempre di più alla T_{rur} fino alla comparsa della

radiazione solare che riporta un innalzamento della differenza soprattutto nel caso estivo. In inverno, come mostrato nella precedente figura (*fig. 22*), l'andamento della temperatura è leggermente diverso. Questo andamento è dovuto principalmente ad una radiazione solare meno intensa.

Prima di procedere con l'analisi dei dati energetici è utile precisare che i risultati ottenuti, sono confrontabili con i valori di output di Bueno nel suo modello *Urban Weather Generator*. La simulazione del modello implementato in EUReCA è stata pertanto testata, valutando l'andamento annuale della temperatura T_{urb} tra i due metodi. Da questo confronto risulta un comportamento pressoché identico per i picchi di temperatura massima giornalieri, mentre si ha un discostamento di un grado nelle ore notturne. Questa discrepanza è giustificata dal fatto che gli archetipi delle costruzioni edilizie di Bueno fanno riferimento alla tipologia statunitense che differisce da quella tipica europea. Nonostante questa differenza, si ottiene per il metodo di Bueno un valor medio dell'isola di calore di 1.25°C con un andamento estivo pressoché similare tra i due modelli, come mostrato in tabella.

Tabella 7: UHI calcolata con EUReCA e UWG

Modello	**T_{media} annuale [°C]**	**T_{media} estiva [°C]**	**T_{media} invernale [°C]**
EUReCA	0.77	1.37	0.41
UWG	1.25	1.28	1.49

Focalizzandosi ora sulle variazioni dei consumi energetici degli edifici dovuti ad un innalzamento delle temperature, soprattutto in estate, si è visto come tale effetto porti ad un marcato aumento dell'energia elettrica utilizzata e ad una lieve riduzione del gas consumato nella stagione di riscaldamento. È utile sottolineare che, nella stagione di riscaldamento, i consumi di energia elettrica sono legati solamente alle macchine ausiliarie. Tali valori risultano di due ordini di grandezza inferiori e pertanto non saranno tenuti in considerazione nelle analisi energetiche. Inoltre, è stata considerata la stagione di raffrescamento compresa tra l'1/6 e il 15/9, solo in via indicativa poiché non c'è nessuna norma che definisca il periodo di condizionamento estivo. Per quel che riguarda il periodo di riscaldamento, si è considerato l'intervallo dal 15/10 al 15/4 come definito dal DPR 412/93 integrato con DPR 551/99 per zone di tipo E, tra cui figura la città di Padova.

Iniziando dall'analisi per la stagione di raffrescamento si è notato come un aumento medio

della temperatura di 1.37°C (*tab. 6*) comporti un incremento di energia elettrica del 12.55%. I valori di energia sono rappresentati nelle tabelle sottostanti. Nella prima sono raffigurati i consumi assoluti per tutti i 580 edifici [kWh] solo nei mesi estivi, mentre nella seconda sono stati rapportati all'area calpestabile totale degli edifici [kWh/m^2].

Tabella 8: Energia elettrica richiesta nei mesi estivi

		giu	lug	ago	set	TOT
E_el senza UHI	[MWh]	2310	3230	3160	5730	9273
E_el con UHI	[MWh]	2630	3640	3520	6480	10438
Variazione	[%]	+13.81	+12.54	+11.61	+12.99	+12.55

Tabella 9: Energia elettrica specifica nei mesi estivi

	Unità	giu	lug	ago	set
E_el senza UHI	[kWh/m^2]	13.43	18.77	18.33	3.33
E_el con UHI	[kWh/m^2]	15.28	21.13	20.46	3.76

È utile ricordare come la richiesta totale di energia elettrica sia suddivisa nelle stagioni in maniera completamente sbilanciata ed eterogenea a causa della diversa tipologia d'impianto, sicché si ottiene una quasi totalità di energia elettrica richiesta nei mesi di raffrescamento pari al 91%, con solo il 9% per i restanti 7 mesi dell'anno.

Come mostrato nella successiva figura si può notare che il mese di luglio e agosto siano quelli che presentano una maggior richiesta di raffrescamento e deumidificazione indipendentemente dalla presenza o meno del UHI, anche se l'effetto di tale fenomeno comporta un innalzamento inevitabile dei valori. L'aumento dei consumi estivi risulta essere elevato in termini percentuali, poiché da quanto si vede si raggiungono crescite maggiori del 10% con un picco del 13.81% in giugno.

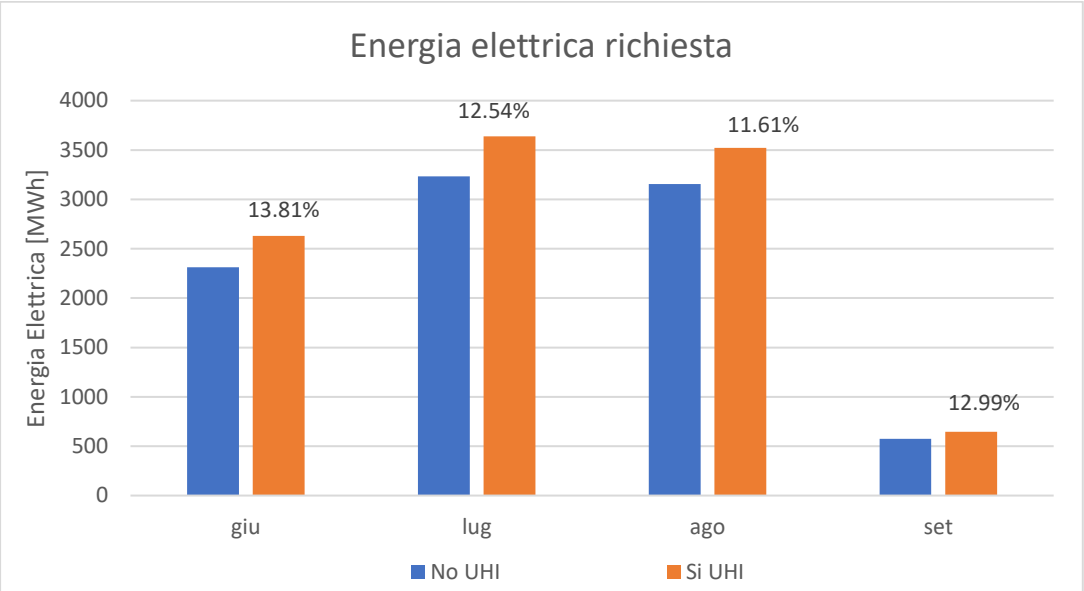


Figura 23: Grafico della potenza elettrica specifica richiesta dagli edifici per ogni mese

Focalizzandosi ora sulla stagione di riscaldamento, si è notato come l'effetto dell'isola di calore incida sulla modifica del consumo di gas naturale delle caldaie in maniera minore rispetto alla energia elettrica nella stagione estiva. Ciò è dovuto al minor incremento delle temperature nel canyon urbano a causa della minore intensità di radiazione solare e ad una assenza del calore ceduto dagli impianti di condizionamento. Quindi questa minor incidenza si ripercuote anche nel ridotto risparmio di combustibile. Gennaio e dicembre sono i mesi in cui si ha il maggior apporto di energia termica e al tempo stesso rappresentano anche le mensilità con la riduzione più lieve di volume di gas naturale. Questo fatto è legato ad una esigua presenza dell'isola di calore, rispettivamente di 0.45°C e 0.25°C per questi 2 mesi *(fig. 18)*. Infine, si può notare dal successivo grafico che la correlazione tra incremento dell'effetto dell'isola di calore e la variazione percentuale della richiesta di gas, si manifesta per i restanti mesi della stagione di riscaldamento con valori via via più rilevanti al crescere della differenza di temperatura.

È utile sottolineare come nella stagione di riscaldamento non si sia tenuto conto del calore associato ai fumi rilasciati dalle caldaie, che potrebbero avere un peso sul fenomeno dell'UHI nei mesi invernali.

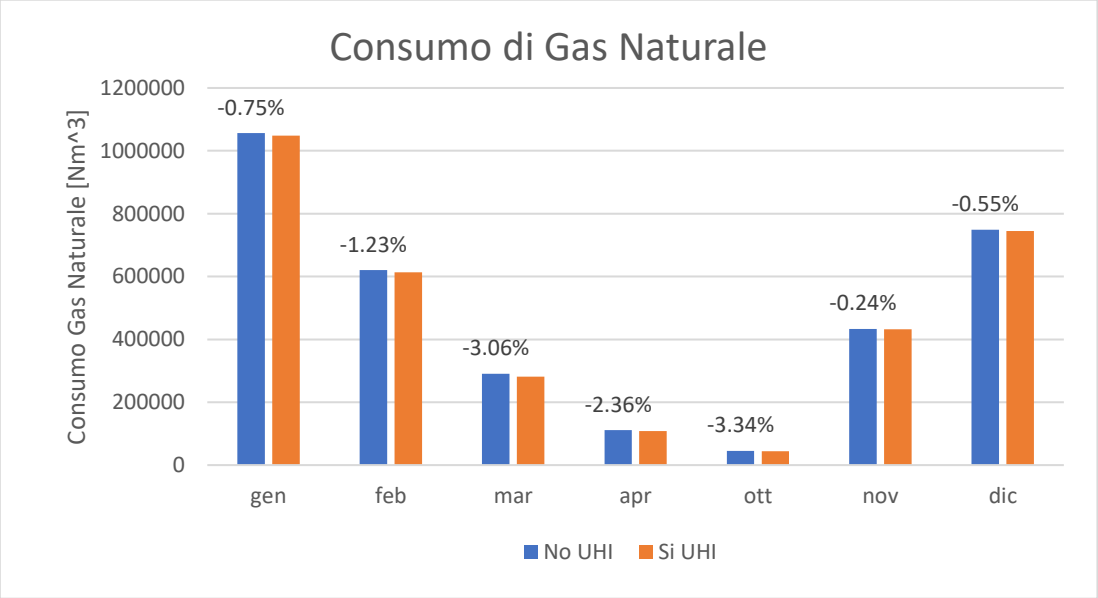


Figura 24: Grafico del consumo specifico di gas richiesto dagli edifici per ogni mese

Tabella 10: Consumo mensile specifico di Gas Naturale

Consumo di GAS		gen	feb	mar	apr	ott	nov	dic
SI UHI	[Nm³/m²]	1.95	1.14	0.52	0.20	0.08	0.80	1.38
NO UHI	[Nm³/m²]	1.96	1.15	0.54	0.21	0.08	0.81	1.39
Variazione	[%]	-0.75	-1.23	-3.06	-2.36	-3.34	-0.24	-0.55

Infine, come ultimo parametro energetico è stato utile analizzare l'andamento di energia primaria durante l'anno. Questo parametro ha un ruolo rilevante poiché permette di confrontare tra di loro le fonti energetiche primarie, come il gas naturale, con fonti di energia secondarie, come l'energia elettrica. Nel caso italiano, si è considerato un fattore di conversione dell'energia elettrica non rinnovabile in primaria di $1.87 \cdot 10^{-4}$ tep/kWh$_e$, come fissato dalla delibera EEN 3/08 dell'autorità per l'energia elettrica e il gas (AEEG).

Il comportamento dell'energia primaria segue le variazioni percentuali delle stagioni di riscaldamento e raffrescamento, mentre su base annuale si ottiene un valore dell'energia primaria maggiore del 4% per effetto dell'isola di calore. La tabella seguente mostra tali risultati, mentre il grafico successivo rappresenta i valori assoluti di energia primaria per i differenti mesi.

Tabella 11: Energia primaria e la sua variazione percentuale

Energia Primaria		**Annuale**	**Stag. Raffrescamento**	**Stag. Riscaldamento**
No UHI	[tep]	4480	1730	2710
Si UHI	[tep]	4670	1950	2680
Variazione	[%]	+4.24%	+12.57%	-1.02%

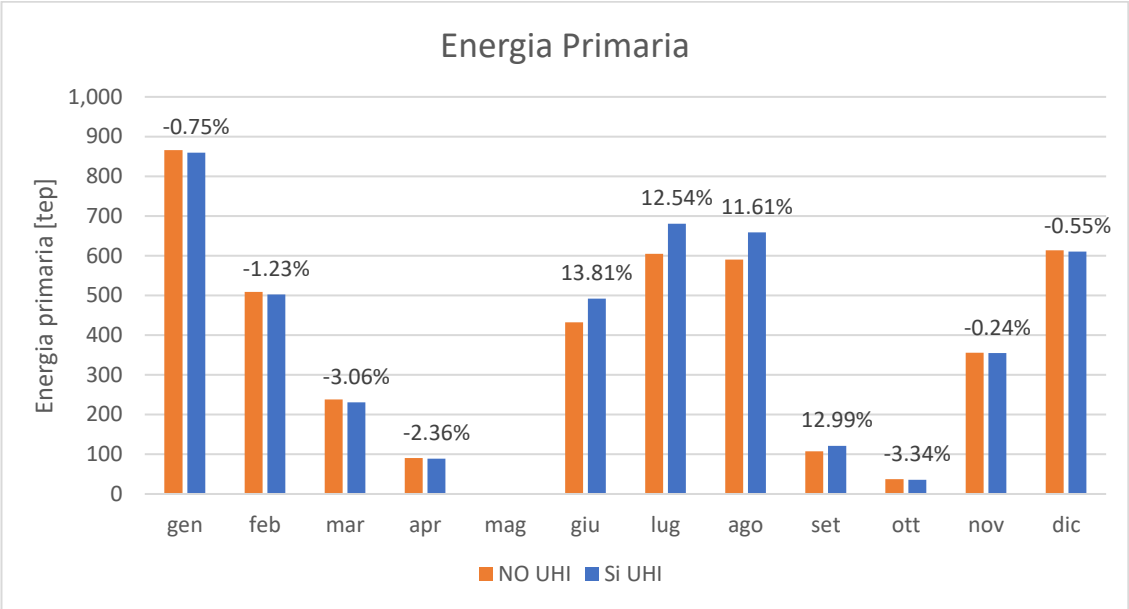


Figura 25: Grafico dell'energia primaria per ogni mese

4.2 EFFETTO DI DIVERSI PARAMETRI SULL'ISOLA DI CALORE

Se la prima parte dell'analisi dei risultati di questa Tesi Magistrale ha riguardato lo studio e l'analisi dell'effetto dell'isola di calore su un caso studio reale, la seconda si focalizza su come le variabili precedentemente analizzate variano rispetto ad alcuni parametri geometrici e tecnici, così da valutare alcune possibili migliorie per attenuare il surriscaldamento annuale del centro urbano.

I parametri scelti sono i seguenti:

- la riflessività del manto stradale e della superficie esterna degli edifici;
- il coefficiente di prestazione dei condizionatori;
- il calore rilasciato dal traffico;
- la densità di vegetazione;
- il calore di scarto degli impianti HVAC.

I criteri elencati saranno analizzati e spiegati nei successivi paragrafi e verranno confrontati con i valori precedentemente mostrati del caso studio, così da valutare se è presente un effettivo beneficio apportato dalla modifica del parametro.

4.2.1 IL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO PER LE PARETI ESTERNE DEGLI EDIFICI E LA STRADA

Il centro urbano è dominato da materiali con alto coefficiente di assorbimento, che accumulando una grande quantità di radiazione solare comportano un riscaldamento dell'aria circostante. Questa è una delle cause di formazione dell'isola di calore nei centri densamente abitati. Tali materiali ad alta capacità termica e conduttiva sono presenti nella costruzione degli edifici e nella realizzazione del manto stradale e comportano un maggior assorbimento della radiazione solare rispetto alla quantità riflessa. Nel caso studio analizzato, il coefficiente di riflessione della superficie stradale è pari all'8%, ciò significa che il 92% della radiazione incidente è assorbita dalla strada.

Per sopperire a questo problema sono stati sviluppati nel corso degli anni materiali innovativi di tipo organico, come vernici e guaine, o inorganico, come i rivestimenti ceramici, per innalzare la riflessione degli edifici e soprattutto della copertura. Difatti è il tetto che nel corso della giornata assorbe più radiazione solare e ciò causa negli immobili non isolati, un alto discomfort termico nelle mansarde o negli attici a causa di una più elevata temperatura. Lo studio e la realizzazione di questi materiali innovativi, soprattutto in California e Florida (USA), ha comportato uno sviluppo commerciale che si sta diffondendo anche in Europa. I materiali organici risultano essere nettamente più economici e maggiormente utilizzati, ma presentano il grande difetto dell'erosione nel tempo dovuto agli agenti atmosferici, che comporta un drastico calo delle proprietà riflettenti. I materiali inorganici presentano una riflettanza solare maggiore o uguale a quella delle vernici con una elevata resistenza allo sporco, ma ad un costo più alto. Questi nuovi materiali costituiscono ciò che in gergo si definisce Cool Roof e contrastano la presenza delle comuni tegole d'argilla sui tetti presenti nei centri urbani italiani. Per le tegole tradizionali si hanno valori di riflessione relativamente bassi, minori di 0.3 che causano una limitata capacità riflettente. In alcune zone dell'Italia meridionale, del Nord Africa e della Grecia viene utilizzata una finitura bianca per la superficie del tetto [41].

Figura 26: Configurazione tipica dei tetti nelle zone urbane dell'Italia

Come si può notare dalla *(fig. 27)*, nella maggioranza dei casi l'applicazione della copertura con un colore bianco non è accettabile per i regolamenti edilizi delle città italiane, ma è più percorribile per capannoni industriali o in generale per gli immobili con copertura piana, così ENEA ha realizzato uno studio cercando di realizzare dei colori con alto coefficiente di riflessione, definiti Cool Colors [41]. In questi casi, non essendo possibile utilizzare vernici o materiali ceramici chiari che permetterebbero la riflessione del 85% della radiazione incidente, si ricorre a materiali ad elevata riflessività soprattutto nella parte dell'infrarosso dello spettro solare. È utile precisare che questo intervallo riguarda le onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda maggiore di 700 nm, che insieme all'intervallo della luce visibile, compresa tra 400 e 700 nm, rappresentano quasi il 95% dell'energia solare totale. Se per i materiali ceramici o organici si può agire con tinte più chiare anche nell'intervallo del visibile, ciò non è possibile per i Cool Colors, così agendo solo nell'infrarosso si otterranno valori di riflessività minori. Queste coperture appaiono con lo stesso aspetto dei materiali canonici all'occhio umano, ma forniscono una riflessività maggiore rispetto alle comuni tegole in argilla [41].

Utilizzando i dati presenti in letteratura si sono modificati i valori dell'albedo della strada e delle pareti esterne degli edifici rispetto al caso iniziale rispettivamente di 0.08 e 0.15, considerando dei nuovi casi reali percorribili e realizzabili:

- $albedo_{strada} = 0.2\ e\ albedo_{pareti} = 0.3$
- $albedo_{strada} = 0.35\ e\ albedo_{pareti} = 0.5$
- $albedo_{strada} = 0.4\ e\ albedo_{pareti} = 0.6$

Per ognuno dei seguenti casi sono stati riportati i risultati delle simulazioni per la temperatura, la potenza elettrica e il consumo di gas naturale, come nel paragrafo precedente. La differenza sostanziale è legata al fatto che ora, i confronti sono stati eseguiti tenendo in

considerazione l'effetto dell'isola di calore. Dunque, le analisi per questo e i successivi paragrafi non devono essere comparate con i valori ottenuti nel paragrafo 4.1.

Tabella 12: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 1 $albedo_{strada} = 0.20$ e $albedo_{pareti} = 0.3$													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.54	22.35	24.09	24.12	29.00	38.94	36.69	34.48	33.66	25.32	19.68	14.77
T_{min}	[°C]	-4.29	-1.18	1.04	6.65	6.82	16.98	16.03	15.15	10.89	7.30	3.75	-2.33
T_{media}	[°C]	2.72	6.72	10.91	13.87	15.65	26.54	25.81	25.77	20.28	15.93	10.65	6.01
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0.00

Tabella 13: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 2 $albedo_{strada} = 0.35$ e $albedo_{pareti} = 0.5$													
		gen	**feb**	**mar**	**apr**	**mag**	**giu**	**lug**	**ago**	**set**	**ott**	**nov**	**dic**
T_{MAX}	[°C]	11.52	22.26	24.04	24.12	28.99	39.03	36.68	34.48	33.66	25.26	19.61	14.76
T_{min}	[°C]	-4.29	-1.18	1.03	6.65	6.81	16.95	15.84	15.13	10.84	7.29	3.75	-2.33
T_{media}	[°C]	2.71	6.69	10.87	13.82	15.61	26.49	25.75	25.72	20.24	15.91	10.65	6.00
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.03	-0.04	-0.08	-0.07	-0.08	-0.08	-0.10	-0.09	-0.07	-0.04	-0.01	-0.01

Tabella 14: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 3 $albedo_{strada} = 0.40$ e $albedo_{pareti} = 0.6$													
		gen	**feb**	**mar**	**apr**	**mag**	**giu**	**lug**	**ago**	**set**	**ott**	**nov**	**dic**
T_{MAX}	[°C]	11.52	22.23	24.03	24.11	28.99	39.04	36.68	34.47	33.63	25.25	19.57	14.76
T_{min}	[°C]	-4.30	-1.18	1.02	6.65	6.81	16.94	15.82	15.13	10.82	7.29	3.75	-2.33
T_{media}	[°C]	2.71	6.69	10.86	13.81	15.59	26.47	25.73	25.71	20.23	15.90	10.64	6.00
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.04	-0.04	-0.09	-0.09	-0.09	-0.11	-0.12	-0.10	-0.08	-0.05	-0.02	-0.01

Nei tre casi elencati si nota come l'andamento della temperatura sia molto simile al caso studio base, mentre i valori medi mensili si sono ridotti di un decimo di grado. Questa riduzione lieve della temperatura è dovuta principalmente alla presenza di una parte rilevante di vegetazione nell'area del distretto e ad un'altezza abbastanza ridotta degli edifici. Queste caratteristiche, dunque, concorrono ad un effetto non marcato di riduzione dell'isola di calore come ci si aspetterebbe, per il caso studio analizzato. I risultati sono rappresentati nel grafico sottostante e si può notare come si ottengono i migliori risultati nei mesi estivi e soprattutto già

con valori non eccessivi di riflessività, come per il secondo caso. Questa maggior differenza presente nel caso estivo, è legata alla maggior intensità e presenza della radiazione solare che se riflessa dalle superfici con buoni valori di riflessività comporta risultati più rilevanti e tangibili. Tuttavia, questa soluzione risulta poco efficiente per attenuare l'innalzamento di temperatura del distretto.

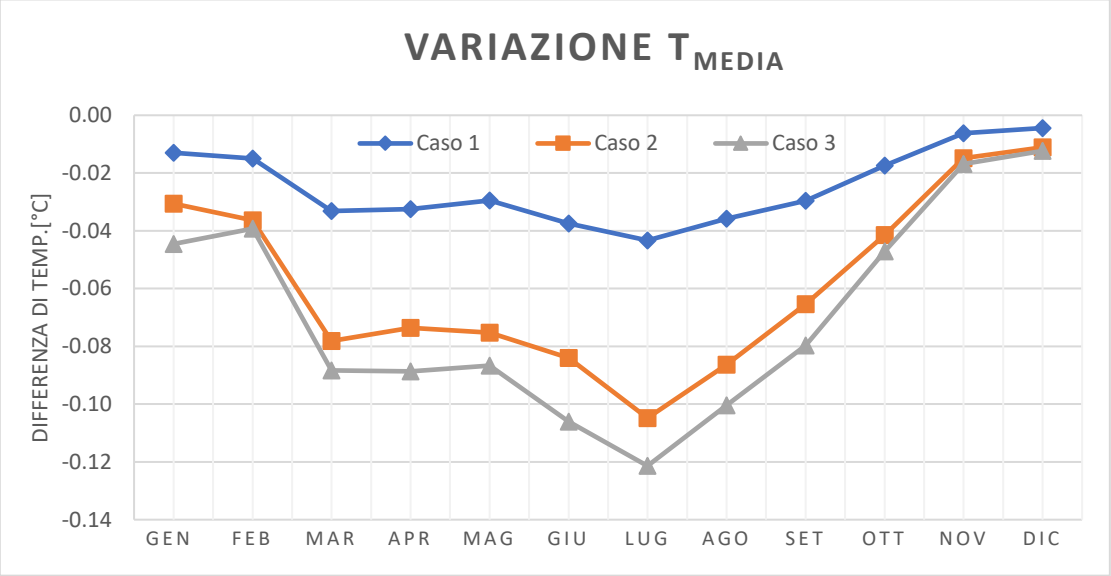


Figura 27: Andamento annuale della differenza tra le T_{media} del caso studio e dei tre casi, con differenti valori di riflessività

L'andamento dei consumi di energia elettrica, rappresentato nelle tabelle successive, risulta essere caratterizzato da una riduzione dei consumi estivi. Il maggior effetto di aumento dell'albedo del caso 3 risulta essere prossimo al valore ottenuto nel caso 2 (*fig. 28)*, pur rimanendo abbastanza contenuto.

Tabella 15: Potenza elettrica mensile del casto studio base e del primo caso con nuova riflessività

CASO 1 $albedo_{strada} = 0.20$ *e* $albedo_{pareti} = 0.3$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 1	[MWh]	2624	3626	3513	646

Tabella 16:Potenza elettrica mensile del casto studio base e del secondo caso con nuova riflessività

CASO 2 $albedo_{strada} = 0.35$ *e* $albedo_{pareti} = 0.5$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 2	[MWh]	2619	3611	3500	644

Tabella 17:Potenza elettrica mensile del casto studio base e del terzo caso con nuova riflessività

CASO 3 $albedo_{strada} = 0.40$ e $albedo_{pareti} = 0.6$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 3	[MWh]	2616	3608	3496	644

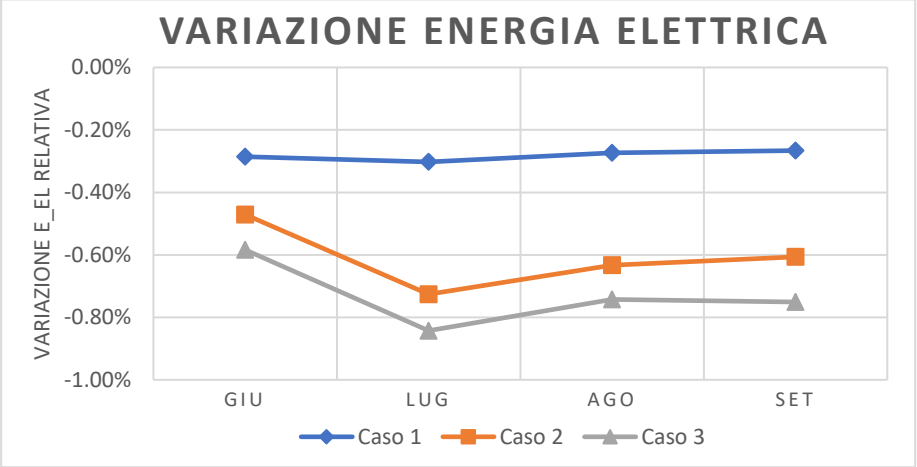


Figura 28:Andamento annuale della variazione di energia elettrica del caso studio e dei tre casi, con differenti valori di riflessività

Infine, la variazione per il consumo di gas naturale risulta essere assai ridotta nei mesi in cui sono accesi gli impianti di riscaldamento, sempre minore dello 0.4%, quindi risulta più significativo confrontare la variazione di energia primaria, tra il caso base e i tre casi modificati, in quanto permette un'analisi sul comportamento energetico dell'intero anno.

Per entrambi i tre casi si ha un effetto positivo sull'energia primaria richiesta dagli edifici, poiché con le modifiche delle riflessività della strada e delle pareti esterne si ha un abbassamento dell'energia primaria rispetto al caso base. Questo comportamento è visibile nelle successive tabelle, nelle quali si ha un effetto via via migliore all'aumentare dell'albedo per le superfici esterne.

Tabella 18: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il primo caso modificato

CASO 1 $albedo_{strada} = 0.20$ e $albedo_{pareti} = 0.3$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 1	[tep]	4660	1950	2680
Variazione	[%]	-0.10%	-0.29%	0.03%

Tabella 19:Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il secondo caso modificato

CASO 2 $albedo_{strada} = 0.35$ e $albedo_{pareti} = 0.5$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 2	[tep]	4660	1940	2690
Variazione	[%]	-0.22%	-0.62%	0.08%

Tabella 20: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il terzo caso modificato

CASO 3 $albedo_{strada} = 0.40$ e $albedo_{pareti} = 0.6$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 3	[tep]	4650	1940	2690
Variazione	[%]	-0.26%	-0.74%	0.09%

4.2.2 VARIAZIONE DELL'EFFICIENZA NOMINALE DEGLI IMPIANTI HVAC

Al giorno d'oggi si fa gran uso di impianti ad aria per il condizionamento estivo ed invernale, dalle piccole residenze ai grandi impianti per gli ospedali e centri commerciali. Ciò è dovuto alla facilità e modulabilità che permette questa tipologia di sistema in fase di progettazione e realizzazione. In questo paragrafo si pone l'attenzione sulle prestazioni della macchina frigorifera andando ad aumentare il coefficiente di prestazione per valutare i benefici che si ottengono sui consumi elettrici.

Gli impianti ad aria in queste simulazioni sono stati utilizzati solo per i mesi estivi, dunque per riferirsi alla prestazione delle macchine si farà uso del coefficiente EER (Energy Efficiency Ratio), che rappresenta il rapporto tra il calore asportato dalla zona termica e l'energia elettrica consumata. Di seguito sono stati riportati i valori nominali dell'EER, mediati per diversi modelli presenti sul mercato, utilizzati per il caso base.

Tabella 21: Potenza nominale ed EER medio per condizionatori ad aria

Potenza Nominale	**EER nominale medio (caso base)**	**Temperatura aria condensatore**	**Temperatura aria evaporatore**
[kW]	[-]	[°C]	[°C]
3	4.22	35	27
5	3.42		
10	3.21		
15	3.25		

In questo paragrafo verranno quindi analizzati gli effetti sui consumi elettrici, per i quattro livelli di potenza nominale, dopo un incremento del EER dei seguenti valori:

- Caso 1, EER aumentato di 0.3;
- Caso 2, EER aumentato di 0.5.

L'efficienza di uno split tipicamente dipende molto dalla temperatura lato sorgente e utenza. In questo caso la variazione di alcuni decimi dell'efficienza nominale modifica l'energia consumata dagli impianti, ma questa variazione poi si ripercuote in modo impercettibile nella variazione della temperatura urbana. Pertanto, in questo caso viene tralasciata l'analisi termica, in quanto la temperatura è del tutto pari al caso base e creerebbe soltanto una ridondanza.

Concentrandosi invece sul lato energetico, i consumi elettrici, riportati nelle tabelle, mostrano le riduzioni più marcate ed evidenti se paragonati alle variabili dei paragrafi precedenti.

Tabella 22: Energia elettrica mensile del casto studio base e del primo caso

CASO 1 $EER_1 = EER_{caso\ base} + 0.3$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 1	[MWh]	2534	3487	3375	611

Tabella 23: Energia elettrica mensile del casto studio base e del secondo caso

CASO 2 $EER_2 = EER_{caso\ base} + 0.5$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 2	[MWh]	2477	3400	3290	590

La riduzione dell'energia elettrica consumata degli edifici raggiunge una media del 4.0% per il primo caso e del 6.4% per il secondo caso, che sono ottimi risultati e rappresentano il valore più alto di riduzione dei consumi tra i diversi parametri. L'incremento dell'efficienza degli impianti di condizionamento, seppur ridotto, comporta una evidente e chiara riduzione dell'energia elettrica richiesta. Le rese delle macchine considerate in questi due casi sono già auspicabili per alcuni modelli e col passare del tempo saranno dei valori standard per la grande maggioranza dei prodotti.

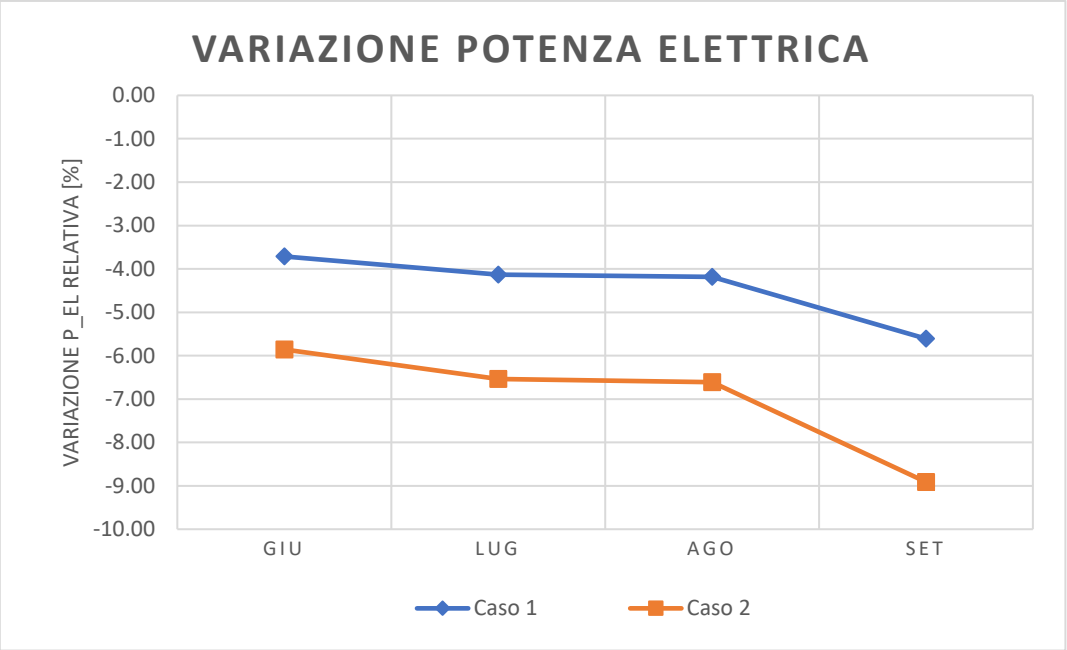


Figura 29: Grafico della variazione dell'energia elettrica rispetto al caso base

Per quel che riguarda la valutazione dell'energia primaria, si ha una netta diminuzione dell'energia primaria nel periodo estivo, mentre su base annuale il valore risulta essere minore, a causa del mancato utilizzo di impianti ad aria nella stagione invernale.

Tabella 234: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il primo caso modificato

CASO 1 $EER_1 = EER_{caso\ base} + 0.3$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 1	[tep]	4590	1870	1970
Variazione	[%]	-1.73%	-4.14%	0.00%

Tabella 25: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il secondo caso modificato

CASO 2 $EER_2 = EER_{caso\ base} + 0.5$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 2	[tep]	4540	1820	1970
Variazione	[%]	-2.73%	-6.54%	0.00%

4.2.3 VARIAZIONE DEL TRAFFICO

Un ulteriore parametro che è stato considerato nell'analisi dei risultati è la variazione del calore antropogenico legato al traffico. Il flusso termico antropogenico è composto da tre diversi fattori: il calore rilasciato dagli edifici *H_waste*, dal traffico *H_traffic* e dall'attività umana. Di questi, il più importante e rilevante risulta essere il calore di scarto ceduto dagli impianti di condensazione e analizzato nel paragrafo 4.2.5, mentre il calore rilasciato dall'attività umana risulta essere irrilevante ai fini delle analisi energetiche. Il calore del traffico è solitamente significante nelle aree costituite da giunzioni stradali densamente trafficate, ma dai diversi studi presenti in letteratura, risulta essere nella maggior parte dei casi un fattore che non influisce in modo rilevante per l'isola di calore. Così si è deciso di valutare se anche nel caso studio di Padova ci fosse un effetto irrisorio del traffico sull'aumento dei consumi energetici e sulle temperature. A tal fine si sono considerati i seguenti casi:

- Caso 1, $H_{traffic}$ *ridotto al 75%*
- *Caso 2,* $H_{traffic}$ *ridotto al 50%*
- *Caso 3,* $H_{traffic}$ *ridotto al 25%*

Per tutti e tre i casi sono stati riportati i valori delle temperature nelle tabelle sottostanti, ma è utile precisare che i valori forniti dalle simulazioni sono invariati rispetto al caso base e questa conclusione segue i risultati degli studi presenti in letteratura. Dimostrando come ci sia un apporto ridotto del calore rilasciato dagli autoveicoli sull'effetto dell'isola di calore.

Tabella 26: Temperature massime, minime, medie e differenza mensile con caso base

CASO 1 $H_{traffic} = 75\%$													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.55	22.40	24.15	24.12	29.10	38.99	36.69	34.48	33.72	25.36	19.72	14.77
T_{min}	[°C]	-4.30	-1.18	1.04	6.66	6.82	17.00	16.07	15.16	10.91	7.29	3.75	-2.33
T_{media}	[°C]	2.72	6.73	10.94	13.89	15.68	26.58	25.85	25.80	20.30	15.95	10.66	6.01
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00

Tabella 27: Temperature massime, minime, medie e differenza mensile con caso base

CASO 1 $H_{traffic} = 50\%$													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.55	22.40	24.15	24.12	29.10	38.99	36.69	34.48	33.72	25.36	19.72	14.77
T_{min}	[°C]	-4.30	-1.18	1.04	6.66	6.82	17.00	16.07	15.16	10.91	7.29	3.75	-2.33
T_{media}	[°C]	2.72	6.73	10.94	13.89	15.68	26.58	25.85	25.80	20.30	15.95	10.66	6.01
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00

Tabella 248: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 1 $H_{traffic} = 25\%$													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.54	22.40	24.15	24.12	29.10	38.99	36.69	34.48	33.72	25.35	19.71	14.77
T_{min}	[°C]	-4.31	-1.18	1.03	6.65	6.82	17.00	16.07	15.16	10.90	7.29	3.74	-2.33
T_{media}	[°C]	2.72	6.72	10.94	13.89	15.68	26.57	25.85	25.80	20.30	15.94	10.65	6.00
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01

Per quel che riguarda l'analisi energetica si è notato come anche in questo caso il traffico non influisca, se non in maniera assai ridotta, sia sulla variazione dell'energia elettrica nel periodo estivo sia nell'arco dell'intero anno sulla energia primaria. Difatti se nei paragrafi precedenti si riuscivano ad ottenere valori prossimi o superiori al 1%, in questo caso sono sempre inferiori di due ordini di grandezza, come mostrato nelle successive tabelle per l'energia primaria.

Tabella 29: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il primo caso modificato

CASO 1 $H_{traffic} = 75\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 1	[tep]	4670	1950	2680
Variazione	[%]	0.00%	-0.01%	0.01%

Tabella 250: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il secondo caso modificato

CASO 2 $H_{traffic} = 50\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 2	[tep]	4670	1950	2680
Variazione	[%]	0.01%	-0.02%	0.03%

Tabella 31: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il terzo caso modifica

CASO 3 $H_{traffic} = 25\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 3	[tep]	4670	1950	2680
Variazione	[%]	0.01%	-0.03%	0.04%

4.2.4 VARIAZIONE DELLA DENSITA' DI VEGETAZIONE

Si è deciso di valutare che effetto abbia la variazione della densità di vegetazione sull'isola di calore. Oggi giorno la maggior parte dei progetti per la riqualificazione dei quartieri in disuso o per la costruzione di nuovi distretti tengono in considerazione la realizzazione di spazi verdi, sia per un discorso sociale di maggior vivibilità della zona urbana, ma anche soprattutto per un motivo ambientale. In questo contesto l'implementazione di nuove zone verdi assume una rilevanza enorme nella riduzione dell'isola di calore, poiché si aumenta il fenomeno dell'evapotraspirazione e si riduce la quantità di materiali fortemente assorbenti, come l'asfalto, abbassando così il surriscaldamento dei centri cittadini [42].

Per valutare gli effetti causati dalla vegetazione si sono considerati due casi in cui in uno si aumenta di un 10% la percentuale di densità di vegetazione, mentre nell'altro si riduce del 10% rispetto al caso base, ottenendo così:

- Caso 1, $Veg_{dens} = 34\%$
- Caso 2, $Veg_{dens} = 14\%$

Come intuibile, si ottiene un effetto positivo, perciò un abbassamento della temperatura nel distretto urbano per il primo caso, mentre si ottiene un risultato opposto per il secondo caso. Le tabelle sottostanti riportano queste situazioni.

Tabella 262: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 1 $Veg_{dens} = 34\%$													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.71	22.46	24.07	24.13	29.00	38.94	36.69	34.48	33.73	25.39	19.82	14.86
T_{min}	[°C]	-4.17	-1.18	1.23	6.68	6.82	16.98	15.92	15.13	11.01	7.32	3.80	-2.29
T_{media}	[°C]	2.84	6.81	10.95	13.91	15.70	26.56	25.83	25.79	20.32	16.03	10.76	6.12
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	0.11	0.08	0.01	0.01	0.02	-0.02	-0.02	-0.01	0.01	0.08	0.10	0.11

Tabella 273: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 2 $Veg_{dens} = 14\%$													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.26	22.32	24.43	24.21	29.11	39.20	36.67	34.51	33.72	25.30	19.48	14.65
T_{min}	[°C]	-4.53	-1.17	0.76	6.61	6.74	17.04	15.96	15.16	10.79	7.26	3.65	-2.41
T_{media}	[°C]	2.52	6.59	10.92	13.85	15.63	26.64	25.87	25.83	20.29	15.81	10.47	5.81
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.22	-0.14	-0.03	-0.04	-0.05	0.06	0.02	0.03	-0.02	-0.14	-0.19	-0.20

Si nota come nel primo caso, l'aumento di vegetazione nel centro cittadino comporti un duplice effetto positivo, aumentando la temperatura nei mesi più freddi, con un valor medio pari a 0.10°C, dovuto alla formazione di un microclima più mite e ad una riduzione, seppur lieve, nei mesi più freddi. Il secondo caso presenta un andamento opposto. Ciò è spiegato dal fatto che assume maggior peso la presenza di materiali con scarsa riflessione all'interno del computo termico, come le superfici stradali e degli edifici, causando un duplice effetto negativo di aumento della temperatura estiva e riduzione di quella invernale.

Il comportamento dei due casi è rappresentato nel grafico seguente e si mostra come il caso con l'incremento della vegetazione comporti un andamento meno marcato e piatto della differenza tra la variazione di temperatura del caso modificato rispetto al caso base, dovuto ad una maggior mitigazione del clima.

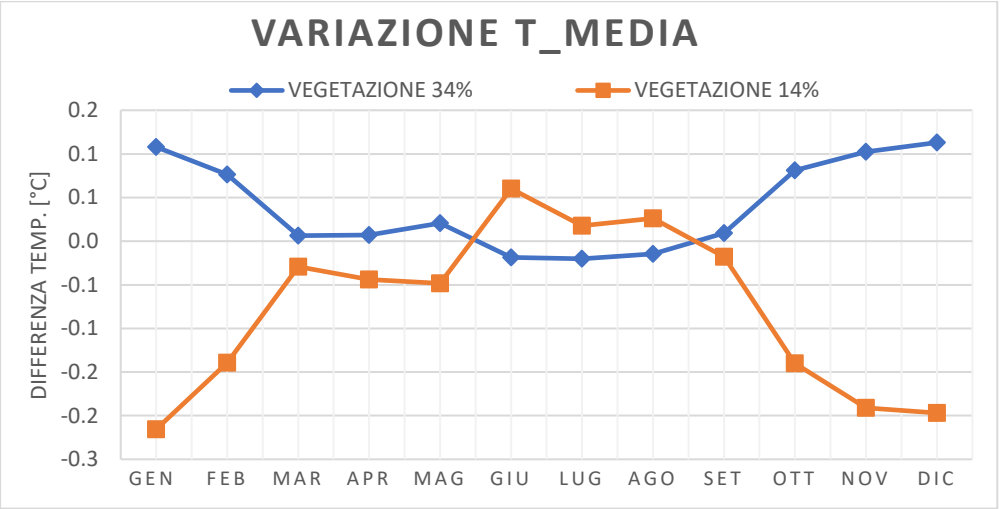


Figura 30: Andamento della differenza di temperatura tra la variazione di temperatura del caso modificato e del caso base

Per quel che riguarda i consumi energetici si sono rispecchiate le variazioni analoghe alle temperature, difatti per il primo caso si ha l'effetto positivo della riduzione dell'energia consumata, mentre per il secondo si ottiene il risultato opposto. Le figure in tabella mostrano

tali risultati.

Tabella 284: Energia elettrica mensile del casto studio base e del primo caso

CASO 1 $Veg_{dens} = 34\%$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 1	[MWh]	2626	3629	3515	646

Tabella 295: Energia elettrica mensile del casto studio base e del secondo caso

CASO 2 $Veg_{dens} = 14\%$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso 2	[MWh]	2641	3641	3528	649

Le variazioni sono rappresentate nella figura seguente ottenendo un valore medio della riduzione di energia elettrica per il primo caso dello 0.2%, mentre un incremento medio per il secondo caso dello 0.23% con un aumento più marcato nel mese di giugno. Tale effetto è dovuto al fatto che giugno sia il mese con la radiazione solare più intensa e, riducendo la riflessione della vegetazione, si verifica un aumento maggiore dei consumi.

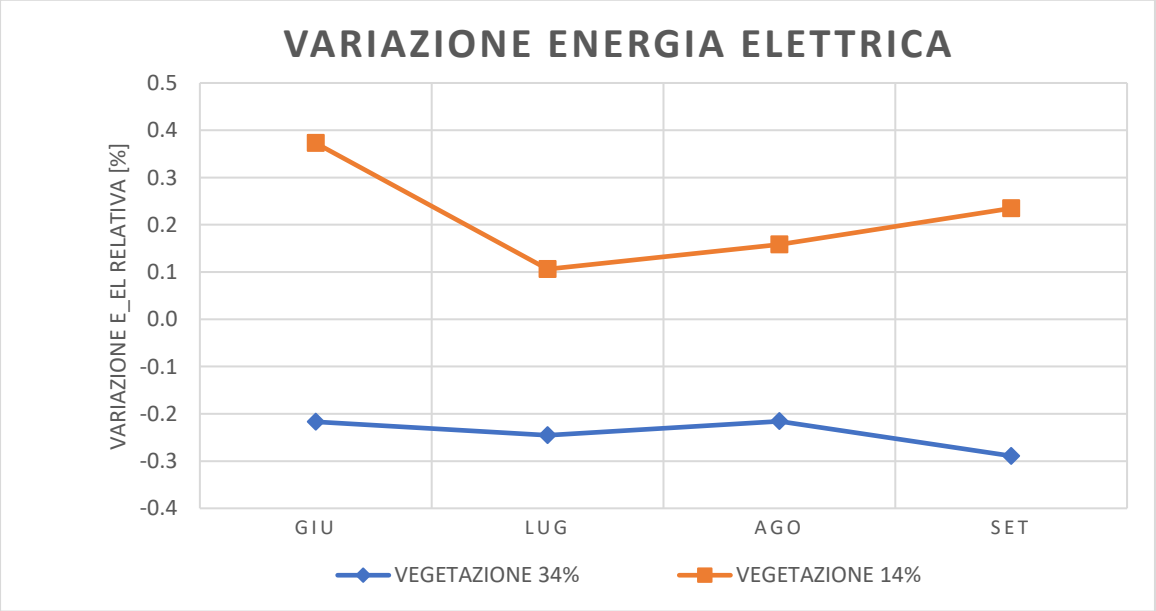


Figura 31: Grafico della variazione dell'energia elettrica rispetto al caso base

L'analisi energetica si conclude con la valutazione dell'energia primaria che segue

l'andamento dei consumi elettrici per i rispettivi casi, rappresentando quindi un aspetto positivo per il primo caso e un aspetto negativo per il secondo caso.

Tabella 30:Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il primo caso modificato

CASO 1 $Veg_{dens} = 34\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 1	[tep]	4660	1950	2680
Variazione	[%]	-0.23%	-0.23%	-0.22%

Tabella 317: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il secondo caso modificato

CASO 2 $Veg_{dens} = 14\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 2	[tep]	4670	1950	2680
Variazione	[%]	0.20%	0.20%	0.20%

4.2.5 SOSTITUZIONE DEGLI SPLIT PER IMPIANTI AD ARIA CON SONDE GEOTERMICHE

Per questa ultima modifica dei parametri, si è deciso di focalizzarsi sul calore di scarto rilasciato dagli split degli impianti di condizionamento ad aria e dai chiller. Per ridurre il flusso sensibile espulso in ambiente H_{waste}, si è optato per un'ipotetica soluzione di sostituzione del condensatore tradizionale, che scambia calore per mezzo dell'aria, con una sonda geotermica, che quindi trasferisce il calore al terreno.

Per valutare la dipendenza da tale parametro dell'isola di calore, sono stati analizzati tre casi in funzione dell'estensione del campo sonde nel distretto:

- caso 1, 25%;
- caso 2, 50%;
- caso 3, 75%.

Così facendo si è implementato nel codice di calcolo un fattore moltiplicativo che riduce H_{waste} di un fattore complementare alla presenza degli scambiatori geotermici nel terreno, ottenendo l'effetto desiderato e necessario per questa analisi. Quindi i risultati ottenuti sono frutto di una estrema semplificazione del problema, poiché non sono stati considerati la conducibilità del terreno, l'efficienza dello scambiatore e altri parametri fondamentali per il

dimensionamento di una sonda geotermica, ma solo il trasferimento di tutto il calore dall'ambiente al terreno. Inoltre, non si è tenuto conto del possibile ulteriore aumento di efficienza dei chiller che permette lo scambio col terreno, quindi l'ipotesi risulta comunque essere in favore di sicurezza.

L'effetto sulla variazione di temperatura, modificando la quantità di calore ceduto dal condensatore all'aria esterna risulta essere tangibile solo nei mesi estivi, in quanto gli impianti di raffrescamento sono spenti nei restanti mesi dell'anno. Di conseguenza, nelle successive analisi termiche ed energetiche vengono considerati solo i mesi della stagione di raffrescamento.

Tabella 328: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 1 $H_{waste} = 75\%$					
		giu	lug	ago	set
T_{MAX}	[°C]	38.99	36.68	34.51	33.61
T_{min}	[°C]	17.00	16.08	15.16	10.93
T_{media}	[°C]	26.55	25.80	25.76	20.29
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.02	-0.05	-0.05	-0.01

Tabella 3933: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 2 $H_{waste} = 50\%$					
		giu	lug	ago	set
T_{MAX}	[°C]	38.99	36.68	34.51	33.61
T_{min}	[°C]	17.00	16.08	15.16	10.93
T_{media}	[°C]	26.55	25.80	25.76	20.29
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.06	-0.11	-0.12	-0.03

Tabella 340: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO 3 $H_{waste} = 25\%$					
		giu	lug	ago	set
T_{MAX}	[°C]	38.99	36.68	34.51	33.61
T_{min}	[°C]	17.00	16.08	15.16	10.93
T_{media}	[°C]	26.55	25.80	25.76	20.29
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	-0.08	-0.17	-0.18	-0.04

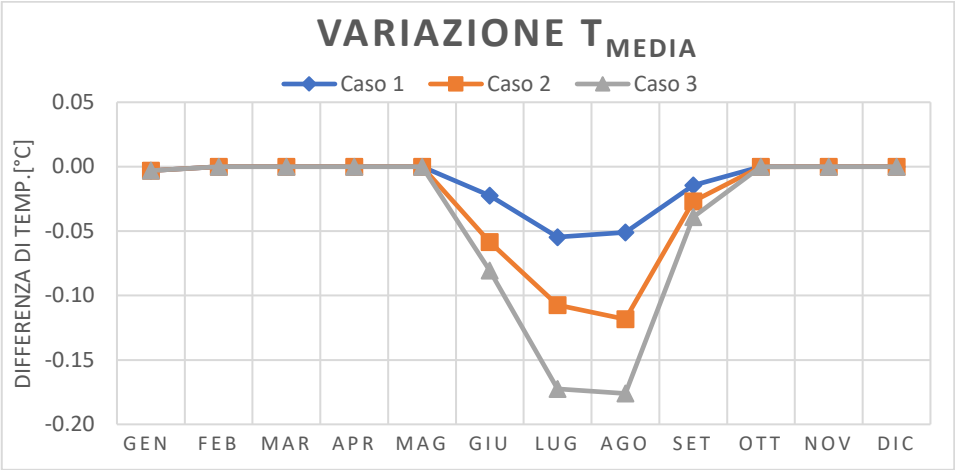


Figura 32:Variazione della Tmedia per i 3 casi

Infine, sono stati riportati i valori per quel che riguarda l'analisi energetica, mostrando nelle successive tabelle i risultati dell'energia elettrica e primaria.

Tabella 351: Energia elettrica mensile del casto studio base e del primo caso

CASO 1 $H_{waste} = 75\%$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso modificato	[MWh]	2623	3622	3508	646

Tabella 362: Energia elettrica mensile del casto studio base e del secondo caso

CASO 2 $H_{waste} = 50\%$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso modificato	[MWh]	2609	3607	349	644

Tabella 373: Energia elettrica mensile del casto studio base e del terzo caso

CASO 3 $H_{waste} = 25\%$					
		giu	lug	ago	set
E_el caso base	[MWh]	2631	3637	3522	648
E_el caso modificato	[MWh]	2600	3588	3473	64

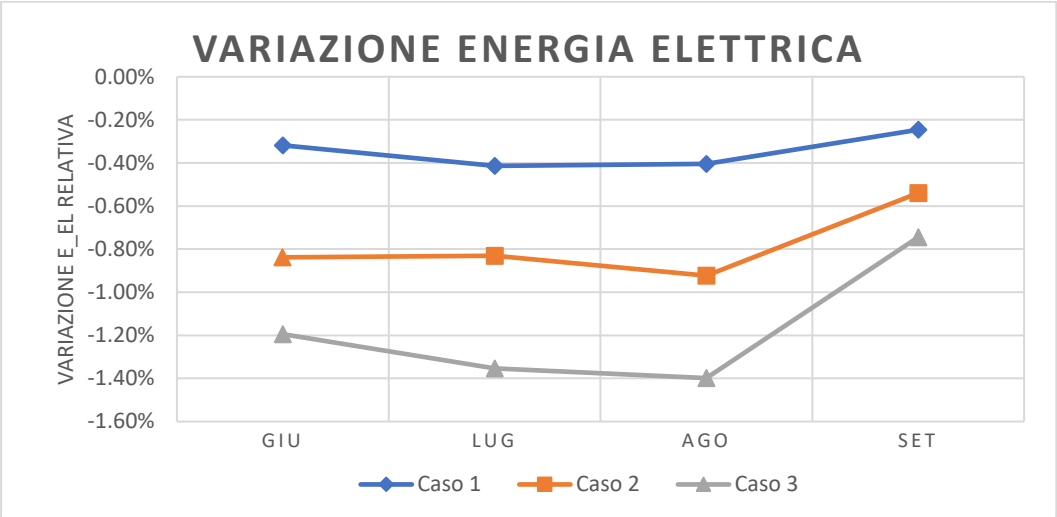


Figura 33: Andamento annuale della variazione di energia elettrica del caso studio e dei tre casi, con differenti H_waste

Come si evince dall'ultima figura si ha una riduzione dei consumi elettrici maggiore del 1% per una sostituzione dei condensatori ad aria con il 75% delle sonde geotermiche e risulta un buon risultato solo su base teorica, in quanto una implementazione così estesa di scambiatori a terreno risulta essere assai complicata, sia per vincoli tecnici che amministrativi. Trascurando in parte questa ultima considerazione, rimane tangibile dalla *fig. 28* come una riduzione del calore rilasciato dai chiller e split influisca in maniera positiva sui consumi elettrici degli edifici.

Infine, uno sguardo sull'energia primaria mostra come ci sia una riduzione annuale, per questo parametro, seppur venga variata la sola energia elettrica e non il consumo di gas naturale, mantenuto costante rispetto al caso studio base. Questo è una buona idea di progettazione che si potrebbe considerare nei progetti urbanistici del futuro poiché permetterebbe una riduzione della domanda elettrica, che rappresenterà inevitabilmente il vettore energetico principale per le nuove realtà urbane sempre più prossime alla decarbonizzazione totale. Inoltre, fornisce un ulteriore salto verso un'efficienza di sistema maggiore, grazie agli scambi termici pressoché costanti col terreno rispetto all'aria nell'arco dell'anno. Permettendo così la progettazione di impianti di raffrescamento che lavorano a temperature di condensazione minori, rendendo tutto il sistema più efficiente.

Tabella 384: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il primo caso modificato

CASO 1 $H_{waste} = 75\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 1	[tep]	4660	1940	2680
Variazione	[%]	-0.16%	-0.38%	0.00%

Tabella 395: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il secondo caso modificato

CASO 2 $H_{waste} = 50\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 2	[tep]	4650	1940	2680
Variazione	[%]	-0.35%	-0.85%	0.00%

Tabella 406: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il terzo caso modificata

CASO 3 $H_{waste} = 25\%$				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 3	[tep]	4640	1930	2680
Variazione	[%]	-0.54%	-1.29%	0.00%

4.3 EFFETTO DELLA COMBINAZIONE DI ALCUNI PARAMETRI SULL'ISOLA DI CALORE

Nel penultimo paragrafo del capitolo si è voluto valutare una situazione futura del distretto analizzato, nel quale si è considerato una combinazione di alcune delle variabili descritte nei casi precedenti, per valutare come cambierebbe la temperatura e il carico sulla rete elettrica se il caso base fosse rinnovato seguendo questi accorgimenti:

- incremento del EER di 0.3 punti rispetto al caso iniziale per gli impianti di raffrescamento;
- $Veg_{dens} = 34\%$;
- $albedo_{strada} = 0.35\ e\ albedo_{pareti} = 0.50$;
- $H_{waste} = 75\%$.

È ricaduta la scelta su questi valori in quanto sono risultati auspicabili e realizzabili in breve tempo. Tra queste modifiche non è stato considerato, nella seguente analisi, il contributo del traffico in quanto si è dimostrato, nel paragrafo precedente, come non comporti effetti evidenti sul fenomeno dell'isola di calore.

Il nuovo caso, così costruito, permette di combinare i seguenti benefici apportati dai singoli parametri:

- l'incremento dell'efficienza delle macchine frigorifere permette una drastica riduzione sia dell'energia richiesta sulla rete elettrica, evitando possibili cause di

sovraccarico e blackout soprattutto nel periodo estivo, sia dell'energia primaria annuale;

- l'aumento percentuale di densità di vegetazione comporta sia un maggior benessere del distretto urbano, rendendolo socialmente più vivibile, sia soprattutto un effetto contrastante dell'isola di calore formando un microclima più mite, con temperature più fresche in estate e più miti in inverno, grazie alla traspirazione delle piante e ad un aumento di riflessività media del centro urbano;
- la maggior riflessività delle pareti esterne degli edifici, dei tetti e della superficie stradale permette una riduzione costante nell'arco dell'anno della temperatura nel canyon e perciò un minor dispenso energetico in estate e una riduzione su base annuale dell'energia primaria;
- la riduzione del calore espulso dai condensatori ad aria permette una riduzione della temperatura estiva, ma può venir tenuto in considerazione anche per uno sviluppo futuro di pompe di calore geotermiche che permettono maggiori efficienze e quindi minori consumi nella stagione di riscaldamento.

La sovrapposizione di questi parametri ha permesso di ottenere i risultati termici riportati nella seguente tabella. Per quel che riguarda le temperature assolute, medie e di variazione rispetto al caso studio base per ogni mese, si rileva una riduzione media nei periodi estivi maggiore rispetto all'incremento medio dei mesi più freddi.

Tabella 417: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO COMBINATO													
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
T_{MAX}	[°C]	11.68	22.34	24.00	24.08	28.99	39.01	36.65	34.47	33.47	25.32	19.75	14.85
T_{min}	[°C]	-4.17	-1.19	1.20	6.67	6.81	16.94	15.84	15.11	10.94	7.32	3.80	-2.29
T_{media}	[°C]	2.82	6.78	10.89	13.85	15.64	26.44	25.70	25.65	20.25	16.00	10.75	6.12
differenza della T_{media} con EPW	[°C]	0.09	0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.13	-0.16	-0.15	-0.06	0.04	0.09	0.11

L'energia elettrica richiesta dal distretto si è ridotta rispetto al caso base che, come si evince dal grafico sottostante, è principalmente dominato dall'incremento di efficienza delle macchine frigorifere, anche se gli altri parametri contribuiscono ad un ulteriore crescita di più dell'1% dell'energia elettrica risparmiata.

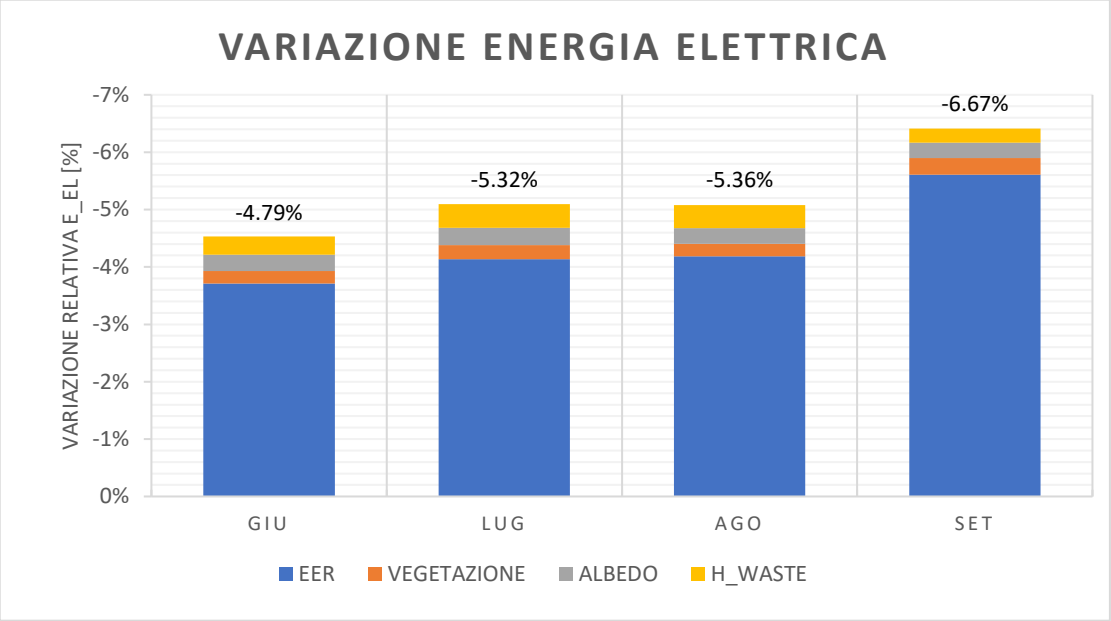


Figura 34:Grafico della variazione dell'energia elettrica rispetto al caso base

Infine, l'ultima variabile analizzata è l'energia primaria che mostra un effetto positivo su base annuale, in quanto si riduce rispetto al caso base, ma con una presenza e un andamento dei parametri che varia lungo il corso dell'anno. Infatti, se la stagione estiva è il massimo periodo di riduzione con il contributo dato dall'efficienza delle macchine che assume maggior peso, nella stagione invernale la riduzione è nettamente inferiore, ma il contributo più rilevante è dato dalla vegetazione, in quanto le macchine frigorifere sono spente e quindi i due parametri sono nulli.

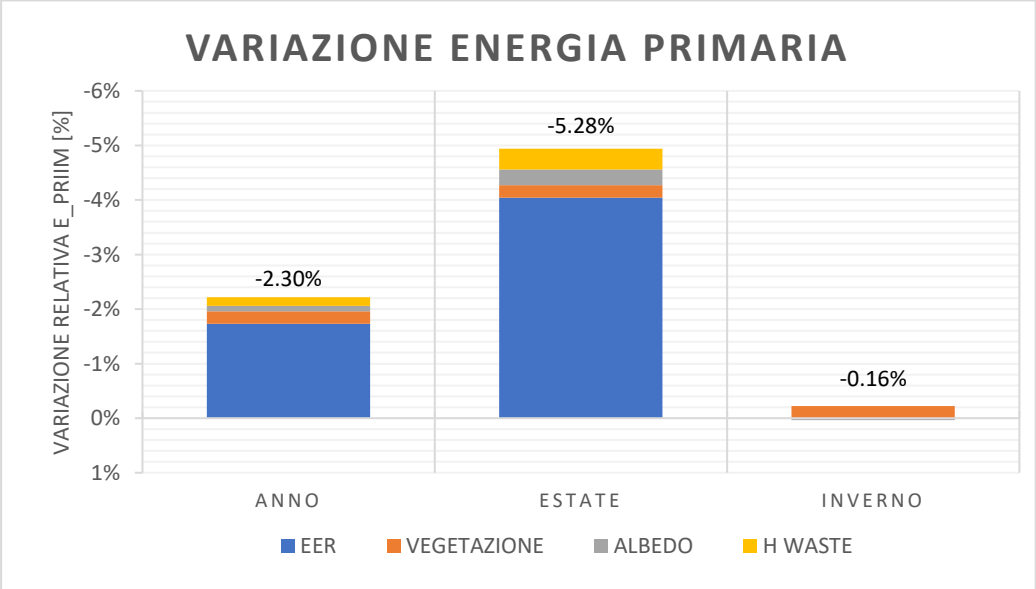


Figura 35: Grafico della variazione dell'energia elettrica rispetto al caso base

4.4 COMBINAZIONE DEGLI EFFETTI DEL RISCALDAMENTO GLOBALE E DELL'ISOLA DI CALORE

In quest'ultimo paragrafo del capitolo si è voluto valutare come una previsione degli effetti del riscaldamento globale al 2050 possa influire sui consumi di energia elettrica e primaria. Tale analisi è stata eseguita considerando anche l'effetto dell'isola di calore così da valutare, statisticamente, come potrebbe presentarsi il centro urbano di Padova in quel periodo. Per far ciò si è utilizzato un tool presente in rete e pubblico, realizzato dall'Università di Southampton, denominato *CCWorldWeatherGen* che permette di creare un file climatico EPW per una vasta quantità di città, utilizzabile nei programmi di simulazione energetica degli edifici [43]. Il programma per valutare le variazioni climatiche future, si basa su uno degli scenari definiti dal *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* nel terzo report (*Third Assessment Report)* pubblicato nel 2001 [44]. Seppur siano usciti nel corso degli anni dei nuovi report più aggiornati da parte del IPCC, il software permette di valutare le variazioni per gli scenari futuri solo utilizzando i dati del *HadCM3 A2,* del terzo report, disponibili comunque in rete e facilmente scaricabili. Il programma risulta essere efficace e facilmente utilizzabile in quanto è implementato nell'ambiente Microsoft® Excel e necessita come dati di input solo il file climatico del luogo che si vuole analizzare, di tipo EPW, e lo scenario temporale desiderato, se nel 2020, 2050 o 2080. Come prima accennato, tale strumento si basa su uno scenario statistico del IPCC e, in questo caso, i dati climatici sono stati adattati alla situazione più grave prevista per il 2100, che prevede una crescita della temperatura di oltre 4°C rispetto al periodo preindustriale e una concentrazione di CO_2 maggiore di 1000ppm. Questi valori fanno parte di ciò che nel 2001 era stato definito come scenario *A2* e che oggi prende il nome di *RCP 8.5*, nei nuovi report disponibili dal pannello intergovernativo. Tale denominazione definisce lo scenario in cui non si implementi nessuna soluzione di mitigazione del riscaldamento climatico fino al 2100. Chiaramente i consumi energetici crescerebbero a causa del surriscaldamento terrestre, così come la probabilità di fenomeni climatici estremi e, soprattutto, i danni agli ecosistemi sarebbero irreparabili. Ne deriva che tutte le politiche ambientali sviluppate in questi e nei prossimi anni devono essere efficaci e dirette a ridurre drasticamente l'effetto serra antropico.

Per valutare l'effetto della combinazione del riscaldamento globale e dell'isola di calore si è inizialmente creato un nuovo file EPW, grazie al programma *CCWorldWeatherGen,* e successivamente si sono sostituiti i dati climatici originali del distretto di Padova con quelli modificati. nel programma EUReCA.

I risultati mostrano dei dati alquanto preoccupanti con un aumento sostanziale delle

temperature nel centro cittadino, raggiungendo addirittura nei mesi di giugno, luglio e agosto una temperatura media di 30.6°C, che confrontato con il valore odierno del caso base di 26.1°C mostra chiaramente come ci sia una crescita termica preoccupante. Nella tabella seguente sono riportati i valori di temperatura media dei mesi più caldi e più freddi e confrontati con il caso base odierno in cui viene considerato il contributo dato dall'isola di calore.

Tabella 428: Temperature massime, minime, medie e differenza media con caso base

CASO NEL 2050				
		anno	giu/lug/ago	dic/gen/feb
T_{MAX}	[°C]	43.9	43.9	24.8
T_{min}	[°C]	-1.5	18.2	-1.5
T_{media}	[°C]	18.2	30.6	7.4
Differenza della T_{media} rispetto al caso base	[°C]	**3.0**	**4.5**	**2.3**

Nella figura sottostante si è voluto mettere in evidenza come ci sia una crescita tangibile della temperatura media per ogni mese, rispetto al caso base, sottolineata dalle differenze termiche rappresentate nelle etichette del grafico.

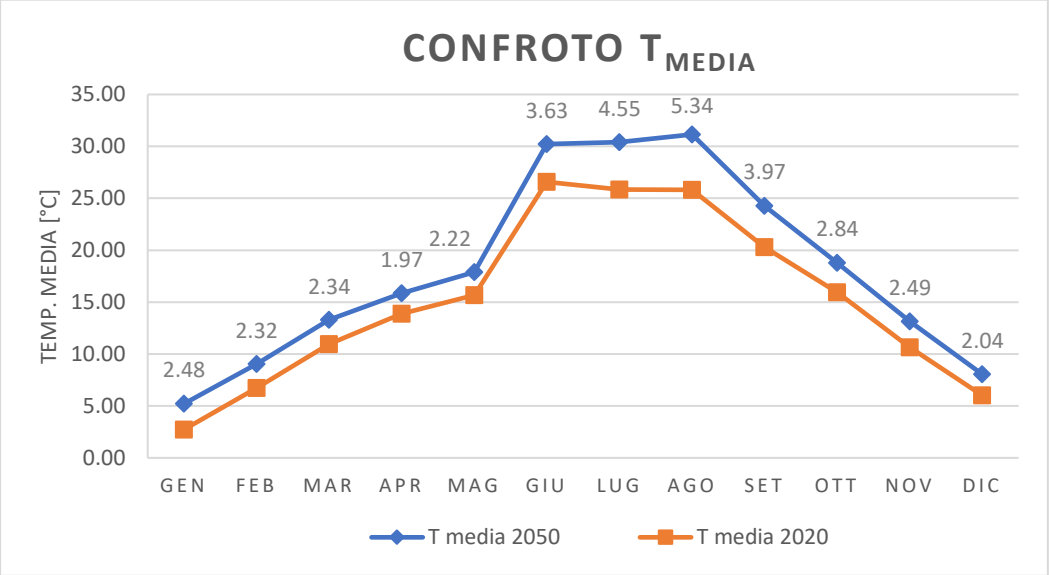


Figura 36: Rappresentazione delle temperature medie mensili

Dopo aver mostrato come ci sia una lievitazione della temperatura nel 2050 rispetto ad oggi, si è voluto confrontare come varia e se varia il contributo dell'isola di calore rispetto al caso base calcolato da EUReCA *(tab. 6)*. Ciò che è emerso dall'analisi è che si ha una crescita termica maggiore dell'isola di calore nel 2050 rispetto al caso base. Difatti, come mostra la

tabella seguente, la presenza dell'isola di calore è maggiore nel caso estivo, mentre per la stagione invernale la crescita termica dovuta al UHI risulta essere invariata.

Tabella 49: Confronto tra UHI di oggi rispetto al 2050, calcolata tramite il modello EUReCA

CONFRONTO DELL'ISOLA DI CALORE				
		anno	**Estate**	**Inverno**
UHI caso base 2020	[°C]	+0.77	+1.37	+0.41
UHI caso 2050	[°C]	+0.87	+1.59	+0.41

La presenza di un ambiente più caldo soprattutto nel pieno della stagione di raffrescamento comporta una crescita vertiginosa del carico sulla rete elettrica. Supponendo di utilizzare delle macchine frigorifere con le stesse efficienze del caso base, per permettere un confronto tra i due casi, si ottengono i seguenti valori per i quattro mesi in cui sono accesi gli impianti.

Tabella 430: Valori dell'energia elettrica richiesta dagli edifici

Energia Elettrica						
		giu	**lug**	**ago**	**set**	**TOT**
E_el caso base 2020	[MWh]	2631	3637	3522	648	10439
E_el nel 2050	[MWh]	4708	7497	8006	1510	21722
Variazione	[-]	+79%	+106%	+127%	+133%	+106%

Risulta evidente come si arrivi ad ottenere dei consumi elettrici che, a causa del riscaldamento globale, siano più che duplicati, comportando così un enorme problema ambientale per la produzione dell'energia elettrica. L'incremento medio del 106% nei consumi elettrici per i quattro mesi estivi è accompagnato da una riduzione dei consumi invernali di gas naturale, come mostrato dalla tabella seguente.

Tabella 441: Consumi di gas naturale per i mesi della stagione di riscaldamento

Consumo Gas Naturale								
		gen	feb	mar	apr	ott	nov	dic
Gas consumato caso base 2020	[Nm^3]	1048189	613169	281828	108258	43722	432432	744630
Gas consumato nel 2050	[Nm^3]	870619	452345	148368	53855	8668	265217	596294
Variazione	[]	-17%	-26%	-47%	-50%	-80%	-39%	-20%

I due effetti complementari della crescita dei consumi elettrici e decrescita dei consumi di gas naturale, causati dall'incremento sostanziale di temperatura, comportano globalmente una crescita dell'energia primaria, come si osserva dalla tabella seguente, osservando le tonnellate equivalenti di petrolio nei due casi.

Tabella 452: Energia primaria e variazione percentuale tra il caso base e il primo caso modificato

Energia primaria				
		anno	Stag. Raffrescamento	Stag. Riscaldamento
Energia Primaria caso base 2020	[tep]	4670	1950	2680
Energia primaria caso 2050	[tep]	6050	4060	1960
Variazione	[%]	+30%	+108%	-27%

Per concludere, risulta chiaro come la situazione simulata e descritta in questo paragrafo sia la situazione più estrema che si possa realizzare, nella quale si ha una completa assenza di azioni volte a ridurre la quantità di CO_2 in atmosfera. Tuttavia, oggi non è così ma si investe molto nella crescita delle fonti di energia rinnovabili, nell'incremento dell'efficienza degli immobili e nella presenza di autoveicoli elettrici. Questa analisi, quindi, fornisce un'informazione che seppur statistica e con forti assunzioni, rappresenta un monito per il futuro, mostrando dei valori di soglia che non si possono raggiungere per non incorrere in un aumento vertiginoso dei consumi di energia primaria, connesso ad un peggioramento di fenomeni atmosferici estremi, quali l'isola di calore, e ad un aggravamento della salute umana.

CONCLUSIONI

La crescita del fenomeno dell'urbanizzazione lascia presupporre che, nel prossimo futuro, gli effetti dell'isola di calore aumentino in modo rilevante, interessando soprattutto le richieste energetiche degli edifici. Questo problema deve essere affrontato non solo dal punto di vista dei singoli edifici, ma anche in adeguate misure di pianificazione urbana volte a ridurre la concentrazione di calore e a dissipare l'eccesso di energia termica.

Per poter definire e tener conto di questa problematica nelle simulazioni energetiche, si è definito in questa Tesi Magistrale un modello per le interazioni tra gli edifici e il microclima della zona urbana. La costruzione di questo nuovo strumento è stata inserita all'interno di un modello bottom-up, EUReCA, per la simulazione energetica degli edifici. L'obiettivo dell'elaborato è stato dunque di includere gli effetti dell'urbanizzazione e del UHI nella simulazione energetica dell'edificio e per farlo si è modificato, opportunamente, il modello del *Urban Weather Generator* per l'integrazione nel linguaggio Python di EUReCA. Il programma è stato incorporato in maniera tale da simulare e modificare la temperatura dell'aria esterna del distretto cittadino, per poi poterla utilizzare all'interno del calcolo dei consumi per gli edifici, creando così un flusso a cascata per ogni time step di simulazione.

Il caso studio analizzato nelle simulazioni è un'area urbana della città di Padova, con un diametro di 800m in cui sono presenti più di 500 edifici adibiti a diversi scopi. È stato possibile analizzare un numero così elevato di edifici senza richiedere uno sforzo computazionale elevato, grazie al metodo dinamico semplificato di EUReCA, basato sull'analogia elettrica (RC). La valutazione dell'effetto dell'isola di calore è stata progettata seguendo questa analogia ed i risultati ottenuti sono confrontabili con i valori del programma *Urban Weather Generator*. Piu precisamente si è confermata e quantificata la presenza dell'effetto dell'isola di calore. L'incremento della temperatura ha comportato anche un effetto negativo sull'aumento del carico della rete elettrica, soprattutto dovuto ad un utilizzo più intensificato dell'impianto di raffrescamento e deumidificazione per gli immobili. Alla luce di questo, nel Capitolo 4 si sono valutati dei possibili rimedi per ridurre il surriscaldamento dell'aria nel centro urbano rispetto alla zona rurale, come l'aumento dell'efficienza dei cicli inversi, l'aumento di vegetazione, l'incremento della riflessività delle superfici fortemente assorbenti, la sostituzione di scambiatori ad aria con sonde nel terreno e la riduzione del traffico. Lo scopo per ognuno di questi scenari è stato quello di valutare la loro influenza sulla crescita termica nel centro cittadino dovuta all'isola di calore. Come si evince dal grafico riassuntivo, si ha un effetto omogeneo tra i diversi parametri analizzati, con un andamento della riduzione similare tra i

contributi, ma con un abbassamento più significativo e sostanziale per la curva dell'aumento di efficienza delle macchine frigorifere.

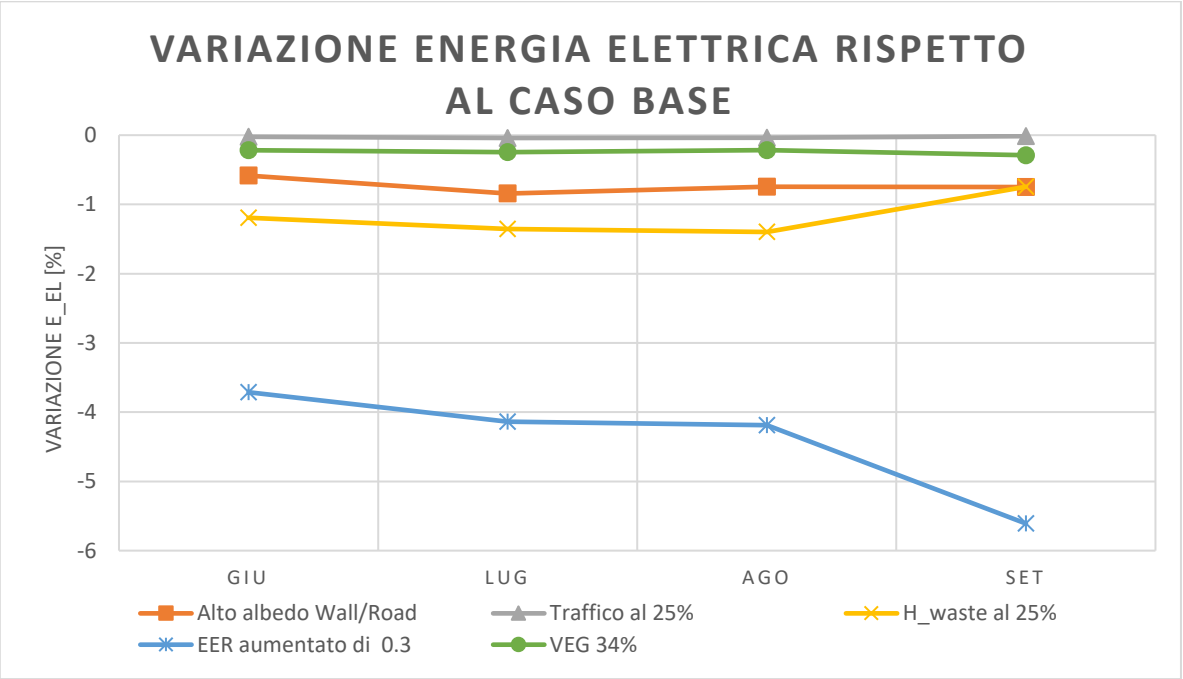


Figura 37: Confronto dei risultati tra i diversi parametri per l'energia elettrica rispetto al caso senza UHI

Inoltre, il grafico mostra come il calore antropogenico dovuto all'attività umana sia totalmente da attribuire al settore edilizio, seppur questo flusso termico sia composto anche da altri contributi come il traffico cittadino, in quanto dalla rappresentazione appare evidente come l'effetto della quasi assenza di autoveicoli *(Traffico al 25%)* sia ininfluente per l'isola di calore rispetto alla riduzione del calore di scarto (*H_waste)* degli impianti di raffrescamento. È utile sottolineare come dall'analisi di tutti i parametri si ottengono degli scenari che riescono ad affievolire l'effetto dell'isola di calore e del corrispettivo incremento del consumo dell'energia elettrica rispetto al caso base.

L'analisi dei risultati si è conclusa con la valutazione dell'effetto combinato del riscaldamento globale e dell'isola di calore per il caso studio di Padova. Lo scenario considerato rappresenta la situazione peggiore che IPCC stima per il 2100, ovvero una crescita di oltre 4°C della temperatura annuale. Difatti si è rilevata una crescita termica dovuta al cambio climatico e al UHI, rispettivamente di 2.1°C e di 0.9°C. La grave situazione mostrata deve rappresentare un segnale d'allarme per le decisioni politiche sul clima, in quanto si è mostrato che se si continuasse con gli standard odierni di inquinamento atmosferico, si arriverebbe ad una crescita più che doppia dell'energia elettrica richiesta dagli edifici, causando un incremento preoccupante dei danni ambientali.

Per concludere, il modello realizzato ha mantenuto lo scopo dell'elaborato ed ha permesso di ricavare dei risultati appaganti per quantificare l'incremento termico annuale nella zona urbana. Nondimeno, sono possibili ancora migliorie per arrivare ad ottenere un risultato più prossimo ai dati misurabili sperimentalmente, aumentando il numero di impianti implementati all'interno del programma EUReCA ed una quantificazione del calore di scarto per gli impianti di riscaldamento.

BIBLIOGRAFIA

[1] United Nations: Department of Economic and Social Affairs/Population Division, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, New York, NY, 10017, United States of America., 2019.

[2] IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland, 2014.

[3] BP, Statistical Review of World Energy, 2020.

[4] IEA, Global Energy Review 2020: The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions, April 2020

[5] United Nations: Department of Economic and Social Affairs, The Sustainable Development Goals Report 2020, New York, NY, 10017, United States of America.

[6] M. Ferrando, F. Causonea, T. Hongb, Y. Chenc, Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches, 2020

[7] Swan, L. G., Ugursal, V. I, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, 2009

[8] M. Ferrando, F.Causone, An overview of urban building energy modelling (UBEM) tools, 2019

[9] A. Stephan, R. H. Crawford, K. Myttenaere, Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia, 2013

[10] T. Hong, Y. Chen, S. H. Lee, M. A. Piette, CityBES: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency, California, USA, 2016

[11] IPCC, Climate change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Summary for Policymakers, 2014

[12] T.R Oke, The urban energy-balance. Prog. Phys. Geogr. 12, 471–508, 1988

[13] T.R.Oke, The energetic basis of the urban heat island, Department of Geography, The University of British Columbia, Vancouver, january 1982

[14] M. Palme, L. Inostroza, G. Villacreses, Andrea Lobato-Corderod, C. Carrasco, From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect, 2017

[15] A. Salvati, H. Coch, Roura, C. Cecere, Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study, 2017

[16] V. Bonacquisti, G.R. Casale, S. Palmieri, A.M. Siani, A canopy layer model and its

application to Rome, 2006

[17] R. Emmanuel, A.Loconsole, Green infrastructure as an adaptation approach to tackling urban overheating in the Glasgow Clyde Valley Region, UK, 2015

[18] Sito del software Envi-met (www.envi-met.com)

[19] Sito del software Urban Weather Generator https://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php

[20] B.Bueno, L.Norford, J.Hidalgo & G.Pigeon, The urban weather generator, Journal of Building Performance Simulation, 2012

[21] B. Bueno, M. Roth, L. Norford, R. Li, Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale, 2014

[22] B.Jan, C. van Putten, N.Mahdavi J. H. Braslavsky, An Analytical Model for Demand Response of Variable-Speed Air Conditioners, 2018

[23] N.Mahdavi, J.H. Braslavsky, C.Perfumo, Mapping the Effect of Ambient Temperature on the Power Demand of Populations of Air Conditioners, 2018

[24] UNI TS 11300-3, Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione dei rendimenti e dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione estiva

[25] L. Allen, F. Lindberg and C. S. B. Grimmond, Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability, 2010

[26] C. S. B. Grimmond, THE SUBURBAN ENERGY BALANCE: METHODOLOGICAL CONSIDERATIONS AND RESULTS FOR A MID-LATITUDE WEST COAST CITY UNDER WINTER AND SPRING CONDITIONS, 1992

[27] D.J. Sailora, L. Lub, A top–down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas, 2004

[28] C.Smith, S.Lindley, G.Levermore, Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: the case of Manchester, 2009

[29] Sito ACI, http://www.opv.aci.it/WEBDMCircolante/

[30] Sito ACI per percentuali parco auto: Capitolo3, TAB.III.36, http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico/annuario-statistico-2020.html

[31] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), UNI/TS 11300-1: Energy performance of buildings. Evaluation of energy need for space heating and cooling. Milan, 2008

[32] German Association of Engineers. Calculation of transient thermal response of rooms and buildings -modelling of rooms (VDI 6007-1). Düsseldorf, 2012

[33] M. F. Jentsc, Climate Change Weather File Generators Technical reference manual for the CCWeatherGen and CCWorldWeatherGen tools, University of Southampton, 2012

[34] Istituto Nazionale di Statistica, “15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011,”

2011

[35] Beuken, K.L, Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen, Dissertation. Freiburg, 1936

[36] Rouvel L., Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten, Brennst-Wärme-Kraft (1972), Vol. 24, 1972

[37] Laret L. Use of general models with a small number of parameters: part 1-theoretical analysis, in: Proc. of 7th Int.Congress of Heating and AirConditioning CLIMA 2000, Budapest, 1980

[38] L. Rouvel, F. Zimmermann, Berechnung des instationären thermischen Gebäudeverhaltens. LH Vol. 55 Iss. 3 (2004), pages 39–46; LH Vol. 55 Iss.4 (2004), pages 24-30.

[39] International Standard Organisation (ISO), ISO 18523-1:2016 Energy performance of buildings: Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation, 2016

[40] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (EN), EN 16798-1 Energy performance of buildings: Ventilation for buildings,2019

[41] A. Muscio, A. Libbra, C. Siligardi, P. Tartarini, Sviluppo di materiali ad elevata riflessione solare per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici durante la stagione estiva, ENEA, *Dip.to di Ingegneria Meccanica e Civile Laboratorio per l'Efficienza Energetica*, 2011

[42] K.R. Gunawardena, M.J. Wells, T. Kershawa, Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity, 2017

[43] Sito CCWorldWeatherGen, https://energy.soton.ac.uk/climate-change-world-weather-file-generator-for-world-wide-weather-data-ccworldweathergen/

[44] IPCC, Climate change 2001, Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Integovernmental Panel on Climate Change, 2001

RINGRAZIAMENTI

Bene ci siamo, vi dico che ho passato più tempo su queste ultime due pagine che sul resto delle pagine, ed evidentemente vedendo la festa di oggi non è stato tempo perso.

Un ringraziamento va al Prof. Angelo Zarrella per avermi ben consigliato di affrontare questa tematica, che si è dimostrata altamente entusiasmante e formativa per la chiusura del ciclo magistrale. Inoltre, tengo a ringraziare in particolar modo Enrico e Pierdonato per la loro sempre diponibilità e puntualità a risolvere i problemi che si presentavano lungo il percorso.

Ringrazio i miei genitori per gli sforzi che hanno fatto per non avermi fatto mancare nulla in questi cinque anni e qualcosa in più, di vita universitaria da fuori sede e da Erasmus. Un ringraziamento particolare va a mia sorella, Giulia per avermi fatto ridere, stressare ed avermi insegnato quanto sia forte, vero ed unico il legame che si può creare tra fratelli; certo ti ho fatto piangere e urlare anch'io, ma alla fine quello che resta, è che in casa se manca uno dei due la situazione cambia e si sente. Grazie Giuli, mamma e papà.

Grazie agli zii e cugini, di Montecchia e Vigasio, che a seconda dei momenti passati con gli uni e con gli altri non mi hanno mai fatto mancare sorrisi e rassicurazioni sempre vere ed indispensabili per aiutarmi a superare le sfide che incontravo. Un grazie particolare va ai nonni Mario e Rita, anche soprannominati "i nonni Morri", che fin da quando ero un tutto corsa, magliette sudate e ginocchia sbucciate mi hanno sempre insegnato a non cedere mai e che la forza di volontà ti fa vincere e supere anche le prove più terribili.

Un grazie va anche a tutti quei pazzi scatenati che ho avuto il piacere e la fortuna di conoscere dalle prime lezioni di Analisi 1, fino a condivide i tornei del Cus, le serate memorabili ai Navigli. Ecco mettere per iscritto gli anni di Padova è una cosa che non so come affrontare, non riesco a fermare una situazione in unico pensiero perché è tutto un intreccio di feste in casa, di giornate al parco Iris e in Force, di pedalate per arrivare in tempo a lezione, di sessioni in gruppo, di giornate intere in Aula studio, di partite alla play, di vacanze al mare e di Spritz che aprivano le migliori serate. Ognuno di voi anche se in maniera apparentemente intangibile mi ha insegnato una sua qualità che mi è stata imprescindibile per poter raggiungere il traguardo dove mi trovo oggi, quindi grazie Gio, Scipio, Marchetto, Lele, Maestro, Marcus, Clod e Fede.

Poi si è intromessa un'esperienza che seppur di soli 6 mesi ha saputo stravolgermi la vita, facendomi innamorare di Sevilla, che è stata teatro di una serie di incontri ed emozioni, che mi

hanno lasciato i segni sulla pelle (in tutti i sensi). L'Erasmus è davvero qualcosa di straordinario che sconfina ogni esperienza fatta precedentemente. Si vero ci sarà stata una pandemia globale a limitarmi e limitarci, ma alla fine si ritorna a casa con la volontà di rimanere là e quella sensazione che i brasiliani definirebbero come Saudade. Grazie Lore, Gio, Joao, Fer, Mat, Eirin, Can, Luccone e Yuika, perché se oggi lo racconto e lo ricordo come l'esperienza più bella e intensa di sempre, il merito è vostro.

Fortuna vuole che ogni volta che tornavo a casa trovassi altri pazzi e cinghios che sapevano come far volare il tempo. Tra serate al Macello, vacanze ignoranti e tamarraj, gite agognate in montagna, bakettini, fantacalci e serate commestibili tra una risata e una pizza da Facci la Pizza non c'è stato alcun momento in cui mi sia sentito fuori posto, anzi devo solo ringraziarvi per tutti questi momenti che ora rivivo piacevolmente come ricordi e che hanno costruito la base di quel che sono diventato oggi. Grazie Giak, Cetti, Bosh, Cotta, Cordio, Asia, Richi, Vispa, Simo, Leo, Ale, Ire, Bove, Enri, Pit, Marti e Gave.

Infine, per concludere, l'ultimo pensiero lo dedico a chi se né andato un po' prima del previsto e che con tutta la sua saggezza e veracità ha saputo insegnarmi l'arte più nobile che una persona possa trasmettere, il sorriso. Perché seppur il sorriso dura un istante, il suo ricordo può durare tutta la vita. Grazie nonna Marcella.