

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**SVILUPPO DI UN WEB TOOL PER L'ANALISI
DELL'INFLUENZA DELLE CONDIZIONI AMBIENTE
SUI PARAMETRI OPERATIVI
DI UNA CALDAIA DOMESTICA**

Relatore: Prof. Ing. Alberto Benato

Laureando: Luca Pegoraro 2080835

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

SOMMARIO	5
1 – INTRODUZIONE	7
1.1 - Innovazione e riduzione dei consumi per un futuro sostenibile.....	7
1.2 - Unione Europea motore trainante del cambiamento	8
1.3 - Progetti di riqualificazione energetica	9
2 – INTERFACCIA UTENTE	13
2.1 - Requisiti di accesso	13
2.2 - Informazioni tecniche richieste all'utente	14
3 – DATABASE	17
3.1 - Database caldaie.....	17
3.1.1 - Caldaie tradizionali e a condensazione.....	17
3.1.2 - Dati tecnici e parco caldaie.....	19
3.1.3 - Regolazione della temperatura di mandata.....	22
3.1.4 - Curva climatica universale	31
3.2 - Database pompe di calore	34
3.3 - Database climatico	35
3.3.1 - Anno caratteristico e parametri principali e secondari	37
3.3.2 - Raccolta dati	37
3.3.3 - Suddivisione dei dati e calcolo delle medie giornaliere	38
3.3.4 - Calcolo della prima cumulata	39
3.3.5 - Calcolo della seconda cumulata.....	42
3.3.6 - Statistica di Finkelstein-Schafer	44
3.3.7 - Ordinamento degli anni	44
3.3.8 - Velocità del vento e presentazione anno caratteristico	45
3.3.9 - Anno caratteristico dell'irradiazione.....	46
3.3.10 - Zone climatiche	48

4 – ALGORITMO DI CALCOLO	51
4.1 - Valutazione dati di input.....	51
4.2 - La firma energetica	56
4.3 - Parametri di output forniti dall'applicativo.....	60
4.4 - Calcolo numero dei pannelli fotovoltaici.....	62
5 – ANALISI PARAMETRICA.....	65
5.1 - Prima fase di simulazione	65
5.1.1 - Comuni campione nelle fasi iniziali di simulazione.....	69
5.1.2 - Criticità nell'utilizzo delle bollette medie per la simulazione dei consumi energetici.....	70
5.1.3 - Correzione delle bollette medie di una zona climatica.....	72
5.1.4 - Correzione delle bollette medie di una provincia.....	76
5.1.5 - Risultati della prima fase di simulazione.....	78
5.1.6 - Estensione dei comuni campione.....	79
5.2 - Seconda fase di simulazione	81
5.2.1 - Impatto della temperatura esterna sul dimensionamento.....	82
5.2.2 - Ulteriori problemi di dimensionamento	87
5.2.3 - Implementazione algoritmo	92
5.2.4 - Adeguamento delle bollette e picco elettrico.....	97
5.3 - Risultati finali simulazione	102
CONCLUSIONI E POSSIBILI SVILUPPI FUTURI.....	107
BIBLIOGRAFIA	109

SOMMARIO

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto volto allo sviluppo di un applicativo utilizzabile da un utente non esperto che punta a valutare la fattibilità della sostituzione della caldaia domestica con una pompa di calore. Questa iniziativa è in linea con le politiche europee che puntano alla completa decarbonizzazione degli edifici entro il 2050 ed è sostenuta da ENEA, ovvero l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile.

In questa fase dello sviluppo del web tool è stata analizzata la struttura del modello matematico e sono stati imposti i primi vincoli e definiti i risultati ritenuti essenziali per valutare la possibilità di sostituzione della macchina di riscaldamento.

L'applicazione prevede tre fasi, una prima di inserimento dati sull'impianto di riscaldamento da parte dell'utente, una seconda di elaborazione di queste informazioni da parte del modello e infine una terza di presentazione dei risultati.

Durante il progetto sono stati definiti i vincoli per poter accedere all'applicativo e indicati i dati essenziali da richiedere all'utente per poter svolgere un'esatta valutazione. Dovendo rendere l'applicativo disponibile anche ad utenti non esperti bisogna fare in modo di richiedere poche e precise informazioni. Al fine di agevolare l'inserimento dei dati, sono stati realizzati anche dei database che contengono ulteriori informazioni sulle tecnologie di riscaldamento disponibili sul mercato. Oltre a queste banche dati, è stata necessaria la costruzione di un registro con l'andamento della temperatura durante il corso dell'anno. Per valutare le prestazioni delle pompe di calore è necessario avere tali dati a disposizione.

Infine, il modello matematico implementato è stato validato tramite un'analisi parametrica. Sono stati analizzati i risultati al variare dei dati di input. In particolare, vengono valutate le dimensioni delle pompe di calore proposte in funzione della località oggetto di studio. Questa fase si può dividere in due parti. Nella prima, viene individuato il modello da seguire per svolgere la simulazione, scegliendo i parametri fissi e quelli variabili ed infine attuando delle modifiche al modello matematico per rendere i risultati più realistici. Nella seconda, viene scelta una singola abitazione come modello di riferimento per tutte le località da esaminare, e il modello matematico viene simulato per

ognuna di esse. Dall'analisi emerge che il comportamento dell'algoritmo è quello previsto. All'aumentare dei gradi giorno, a parità di abitazione modello, corrisponde un incremento della potenza da installare della pompa di calore.

1 – INTRODUZIONE

1.1 - Innovazione e riduzione dei consumi per un futuro sostenibile

Nel corso della storia umana, la crescita della popolazione è sempre stata accompagnata da un incremento dei consumi energetici. D'altra parte, al crescere del consumo corrisponde un miglioramento della qualità della vita umana. Negli ultimi 60 anni la popolazione mondiale è quadruplicata, passando da circa due a otto miliardi di individui. Di pari passo è stato, di conseguenza, l'aumento del consumo di energia, il quale è cresciuto all'incirca di due volte e mezzo passando all'incirca da sei milioni di tonnellate equivalenti di petrolio a circa quattordici milioni. Le previsioni dell'ONU prevedono un aumento della popolazione umana per il 2100 fino a undici miliardi e un incremento del fabbisogno di energia pari a quattro volte e mezzo la domanda attuale. Questi scenari pongono sfide significative per la gestione delle risorse [1].

Ogni anno, dai Paesi sviluppati, vengono emesse all'incirca 12,5 miliardi di tonnellate di anidride carbonica oltre ad altri gas, quali metano, ossidi di azoto, etc., che contribuiscono fortemente all'effetto serra e al surriscaldamento globale. In questa prospettiva, la situazione attuale non è incoraggiante dato che il 75% circa dell'attuale domanda energetica è coperta da combustibili fossili.

Per far fronte a questa situazione, nel 2015, viene stipulato dagli Stati membri della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), l'Accordo di Parigi [2]. Uno degli obiettivi del trattato internazionale è di contenere l'aumento della temperatura media mondiale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali e di proseguire gli sforzi per limitarlo a 1,5°C. Per raggiungere questo obiettivo, le emissioni di anidride carbonica dovrebbero essere ridotte di quattro volte entro il 2100, portando il contributo dei combustibili fossili a coprire solo il 5% del fabbisogno energetico previsto per quella data. Di pari passo, si renderebbe necessario un incremento di diffusione delle energie alternative pari al 2% annuo nel corso di questo secolo. L'accordo del 2015 non è il primo trattato internazionale in materia ambientale riguardante il surriscaldamento globale, già nel 1997 con il Protocollo di Kyoto si erano intraprese delle misure per contrastare l'aumento di temperatura [3]. Questa convenzione

prevedeva la riduzione di sei famiglie di gas serra: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), ossidi di azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC), esafluoruro di zolfo (SF₆); con lo scopo di ridurre del 5% le emissioni di questi gas rispetto ai livelli del 1990 nel periodo 2008-2012.

Per raggiungere questi ambiziosi obiettivi, è fondamentale ridurre la domanda di fabbisogno energetico. Occorre innanzitutto concentrarsi sulla ricerca di soluzioni completamente innovative in tutti i settori che utilizzano materiali ed energia, sostituendo le tecnologie attuali piuttosto che limitarsi a ottimizzarle con miglioramenti marginali di efficienza. Tuttavia, di pari importanza, è promuovere un cambiamento nella mentalità delle persone su questi temi.

Per poter valutare le azioni più efficaci per la risoluzione del problema energetico, bisogna valutare i settori specifici dove avvengono i consumi. In Italia, come in Europa, gli edifici sono responsabili del consumo del 40% dell'energia primaria totale contro il 17% dell'industria ed il 43% dei trasporti. In particolare, solo il 30% dei consumi energetici derivante dagli edifici è da attribuirsi ad immobili di tipo commerciale, mentre il restante 70% proviene da edifici ad uso residenziale. Questa evidenza offre un vantaggio, è molto più semplice agire a breve sugli edifici, piuttosto che ridurre i consumi nel settore dei trasporti. Al giorno d'oggi esistono tecnologie costruttive ed impiantistiche tali da limitare il fabbisogno netto dell'edificio e aumentare il contributo di energia non fossile.

1.2 - Unione Europea motore trainante del cambiamento

L'Unione Europea è promotrice di questo percorso di efficientamento energetico degli edifici, tant'è che uno degli obiettivi individuati dalla Commissione nel percorso di rendere l'Unione climaticamente neutra entro il 2050 è di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza [4]. Per conseguire l'ambizioso risultato di ridurre a zero le emissioni, si rendono necessari degli obiettivi intermedi, ridurre prima entro il 2030 le emissioni almeno del 55% e poi entro il 2040 del 90%, in entrambi i casi rispetto ai livelli del 1990. Sempre per il 2030, l'attuale programma strategico mira ad aumentare del 32% la quota di energia da fonti rinnovabili nel consumo energetico e di migliorare l'efficienza energetica del 32,5%. Per indirizzare gli Stati membro verso tale traguardo,

nel biennio 2023-2024, sono state emanate due direttive di particolare importanza. La direttiva sull'efficienza energetica 2023/1791, denominata EED, Energy Efficiency Directive, e quella sulla prestazione energetica nell'edilizia 2024/1275, denominata EPBD, Energy Performance of Buildings Directive.

La direttiva EED rende vincolante per i paesi dell'UE garantire collettivamente un'ulteriore riduzione dell'11,7% del consumo energetico entro il 2030, rispetto alle proiezioni di consumo per il 2030 formulate nel 2020 [6]. Ciò si traduce in un limite massimo al consumo di energia finale dell'UE pari a 763 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio [Mtep] e a 993Mtep per il consumo primario. Per fornire un termine di paragone, in Italia al 2020 il consumo di energia primaria è pari a 158Mtep e quello dell'energia finale a 124Mtep [7]. Le nuove norme stabiliscono che i Paesi membri devono ridurre il consumo energetico in modo progressivo, aumentando lo sforzo ogni due anni. Dal 2021 al 2023, è richiesto un risparmio annuo pari allo 0,8% del consumo finale di energia. Questo impegno aumenta al 1,3% per il biennio 2024-2025 per arrivare all'1,9% nel periodo 2028-2030 [8].

La direttiva EPBD si pone anch'essa l'obiettivo di ridurre gradualmente le emissioni di CO₂ degli edifici europei, puntando alla completa decarbonizzazione entro il 2050 [9]. Per realizzare questo traguardo, la direttiva promuove la riqualificazione del patrimonio edilizio e il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, favorendo l'accesso a finanziamenti dedicati e incentivando la graduale eliminazione delle caldaie a combustibili fossili.

1.3 - Progetti di riqualificazione energetica

In linea con le premesse precedenti, ENEA, ovvero l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, consapevole dell'importanza di ridurre il consumo energetico e delle emissioni nel settore edilizio, si impegna attivamente nella promozione di progetti di ricerca che facilitino la transizione verso un modello più sostenibile che riduca i consumi e gli sprechi e favorisca la diffusione di nuove tecnologie. Attraverso l'avvio di diverse iniziative, l'agenzia mira a migliorare

l'efficienza energetica degli edifici e a sviluppare tecnologie innovative, contribuendo così alla riduzione delle emissioni e al raggiungimento degli obiettivi climatici.

Un esempio degli studi condotti da questo ente riguarda i vantaggi dell'installazione di tetti e pareti verdi nel miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. Il cosiddetto “cappotto verde” di piante su tetti e pareti, infatti, può garantire una riduzione della temperatura interna in estate fino a 3°C e consente di abbattere quasi il 50% del flusso termico tramite l'ombreggiamento e la traspirazione di coltri vegetali disposte a protezione dalla radiazione solare [10].

Un altro progetto europeo che fa capo ad ENEA riguarda la realizzazione di una rete integrata di servizi a supporto di quanti intendano ristrutturare il proprio immobile. L'iniziativa prevede la realizzazione, da parte di professionisti del settore o dalla pubblica amministrazione, di servizi integrati di riqualificazione degli edifici IHRS (Integrated Home Renovation Services) che forniscono sul territorio supporto tecnico, economico e giuridico [11].

Ancora, in linea con le recenti direttive europee, ENEA suggerisce i principali interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente per contenere i consumi e ridurre le emissioni inquinanti [12]:

- Isolamento della copertura a falde, con isolante sottotegola o a pavimento;
- Isolamento all'esterno con sistema a cappotto o con facciata ventilata;
- Sistema di schermatura solare con piante;
- Sostituzione del generatore di calore;
- Isolamento delle reti di distribuzione di riscaldamento e acqua calda sanitaria;
- Sostituzione dei sistemi di ricircolo e delle pompe di distribuzione;
- Sistema di termoregolazione e contabilizzazione del calore.

Queste sono solo alcune delle iniziative condotte da ENEA e questa tesi si inserisce proprio nell'ambito di una di esse. Il progetto si focalizza sugli utenti domestici e punta a valutare la fattibilità della sostituzione della caldaia con una pompa di calore attraverso un web tool utilizzabile da un utente non esperto. Questo intervento è fortemente indicato ed è infatti presente nella lista delle azioni consigliate. Questa misura mira a migliorare l'efficienza energetica dell'edificio, riducendo sia i consumi che le emissioni di CO₂.

L'eventuale sostituzione deve garantire il fabbisogno termico richiesto dall'utente senza intervenire sui terminali dell'impianto di riscaldamento.

Questo progetto è il risultato di una pianificazione mirata. Infatti, quello delle pompe di calore, grazie sicuramente alle politiche europee, è un mercato in crescita e lo conferma il rapporto annuale pubblicato da EPHA, European Heat Pump Association, che evidenzia come nel 2022 le vendite in Europa sono cresciute del 38%, con 3 milioni di nuove pompe di calore residenziali installate, portando il totale a circa 20 milioni di unità [13]. In particolare, in Italia, dati al 2022, sono presenti all'incirca 520000 unità con un incremento rispetto all'anno precedente del 35%. Non deve sorprendere il raggiungimento di questo traguardo. Per facilitare l'installazione e la diffusione delle pompe di calore, il Regolamento UE 2022/2577 prevede procedure autorizzative di installazione più rapide e semplificate [14]. Inoltre, a livello italiano, sono stati emanati diversi incentivi, come l'Ecobonus, che permettono di ottenere uno sconto fiscale tra il 50% e il 65% per interventi finalizzati all'incremento dell'efficienza energetica e alla produzione di energia termica da fonti rinnovabili.

2 – INTERFACCIA UTENTE

2.1 - Requisiti di accesso

L'obiettivo ultimo del progetto è di rendere disponibile un applicativo che dia la possibilità di confrontare la propria caldaia domestica con le pompe di calore disponibili sul mercato. Un'applicazione è composta da due componenti principali, l'interfaccia grafica, che consente l'interazione con il software, e il codice di calcolo, che rappresenta i dati e le operazioni gestite dal programma. Questo lavoro di tesi si focalizza proprio sullo sviluppo della componente software che, acquisiti i dati inseriti dall'utente tramite interfaccia grafica, li elabora per comprendere la fattibilità o meno della sostituzione della caldaia con la pompa di calore. In particolare, sono stati costruiti i database e si è sviluppato il codice che esegue le computazioni necessarie. Sono stati inoltre analizzati i diversi dati di input da richiedere all'utente e le limitazioni per chi desidera accedere all'applicativo.

ENEA ha contribuito attivamente al progetto, fornendo indicazioni sui vincoli per gli utenti che desiderano utilizzare l'applicativo. L'abitazione interessata deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Riscaldamento autonomo;
- Riscaldamento con caldaia a punto fisso;
- Corpi scaldanti: solo radiatori;
- Lavori di isolamento eseguiti di recente sul cappotto, finestre, tetto, infissi;
- Abitazione che è stata abitata dopo i lavori;
- Abitazione che soddisfa le esigenze di riscaldamento richieste dall'utente;
- Disponibilità delle bollette di riscaldamento dell'ultimo anno, comprensive del periodo estivo.

Un impianto di riscaldamento autonomo è costituito da una caldaia e una rete di distribuzione che rispondono all'esigenza di una singola abitazione e, a differenza degli impianti centralizzati, è possibile attivarlo, o disattivarlo, in qualsiasi momento. Quest'altra tipologia è soggetta a orari di accensione stabiliti a livello nazionale. Gli

impianti di riscaldamento centralizzati prevedono una caldaia comune a più abitazioni e offrono il vantaggio di un consumo inferiore di combustibile rispetto ad un impianto autonomo a parità di calore prodotto.

Un altro requisito è che l'impianto sia associato ad una caldaia a punto fisso. Questa tecnologia verifica, solitamente tramite un termostato, la temperatura dell'ambiente domestico rispetto a quella impostata; se è inferiore attiva l'impianto di riscaldamento mentre se è uguale o superiore ne interrompe il funzionamento. Questo sistema di regolazione è superato e nelle caldaie commerciali moderne si preferisce utilizzare un impianto associato ad una curva climatica. Questo aspetto verrà approfondito nel Capitolo 3.1.5.

Gli ulteriori vincoli vengono richiesti in modo tale da poter fornire indicazioni corrette riguardo i consumi. L'utente deve aver abitato continuativamente l'immobile dopo gli interventi di riqualificazione in modo tale da assicurarsi che il sistema di riscaldamento soddisfi pienamente il fabbisogno termico richiesto. Un'eventuale sostituzione basata su valori di consumo non adeguati continuerebbe a non garantire il comfort richiesto. Infine, l'utente deve essere in grado di fornire le bollette dell'ultima stagione di riscaldamento, inclusi i consumi estivi per escludere dal calcolo del fabbisogno termico la quantità di combustibile relativo alla produzione di acqua calda sanitaria e alla cottura dei cibi.

Nei prossimi Capitoli verrà analizzata la struttura del modello matematico alla base dell'applicativo. In seguito, verranno specificati i dati tecnici richiesti all'utente, seguiti dalla procedura per la creazione dei database necessari ai calcoli. Sarà quindi analizzato il funzionamento del codice prodotto e, successivamente, verranno presentati i risultati forniti all'utente. Infine, sarà descritta l'analisi parametrica condotta per verificare che il modello matematico realizzato produca risultati verosimili.

2.2 - Informazioni tecniche richieste all'utente

Se l'utente soddisfa tutti i requisiti delineati al Capitolo precedente, l'applicativo procede con la fase successiva, ovvero l'acquisizione dei dati tecnici dell'immobile. Sono previste tre fasi di inserimento, ciascuna delle quali richiede diverse tipologie di dati. La prima riguarda l'anagrafica dell'abitazione, la seconda si concentra sull'impianto di riscaldamento e la terza è dedicata ai consumi energetici.

Nella prima sezione vengono richieste le seguenti informazioni:

- Nome del comune nel quale è accatastato l'immobile sotto studio;
- CAP, codice di avviamento postale, del comune;
- Anno di costruzione dell'immobile;
- Tipologia dell'immobile (villetta singola, appartamento in condominio a singolo piano, appartamento in condominio a due piani, appartamento in condominio a tre piani, appartamento in condominio a quattro o più piani);
- Classe energetica di appartenenza dell'immobile;
- Metri quadrati di superficie dell'immobile;
- Altezza delle stanze.

I primi due punti di questo elenco sono fondamentali per identificare in modo univoco il comune di appartenenza dell'immobile. In questo modo, è possibile associare le temperature esterne medie della località in cui è presente l'edificio e valutare con precisione le prestazioni della pompa di calore. Viene quindi creato un database che contiene i dati climatici medi di tutti i comuni italiani.

Tutte le ulteriori informazioni richieste all'utente sono necessarie a determinare le prestazioni energetiche dell'edificio.

Nella seconda sezione, sono necessarie le seguenti informazioni riguardo l'impianto di riscaldamento:

- Tipologia di caldaia installata (tradizionale, a condensazione);
- Anno di installazione della caldaia;
- Potenza installata;
- Alimentazione della caldaia (gas naturale, GPL, gasolio, elettrica, biomassa);
- Efficienza della caldaia;
- Tipologia di radiatore installato (in ghisa, in acciaio, in alluminio) e relativi ingombri (altezza, larghezza);
- Impianto di regolazione della temperatura (termovalvole, termostato singolo, un termostato per singola stanza);
- Orario di accensione dell'impianto di riscaldamento.

Tutti questi dati vengono utilizzati per determinare le prestazioni energetiche dell'edificio. L'applicativo considera caldaie con potenza installata inferiore a 35 kW. Le ragioni di questo vincolo sono due: 35 kW è il limite massimo di potenza installabile oltre il quale si richiede un locale tecnico dove installare il generatore di calore e, nella stragrande maggioranza delle abitazioni che si intende analizzare, il generatore di calore non supera i 24 kW. Ad affiancare i dati inseriti dall'utente, viene creato un apposito database che contiene ulteriori informazioni sui modelli di caldaia presenti in commercio.

Per quanto riguarda l'orario di funzionamento dell'impianto, si accetta l'indicazione al massimo di due periodi di accensione durante l'arco della giornata.

Nella terza e ultima sezione di input vengono richieste le seguenti informazioni:

- Tipologia di bollette ricevute (mensili o ad intervalli variabili);
- Consumo del combustibile.

L'utente che non dispone di bollette mensili ha due opzioni: può inserire i consumi delle bollette bimestrali oppure caricare tre bollette estive e tre bollette invernali. In entrambi i casi, è necessario indicare non solo il consumo, ma anche gli estremi del periodo di riferimento. È fondamentale che le bollette caricate non si sovrappongano temporalmente. In questa fase dovrà essere indicata anche la tipologia di combustibile utilizzata.

3 – DATABASE

I soli dati tecnici inseriti dall'utente non sono sufficienti per valutare le prestazioni delle diverse tecnologie di riscaldamento. Per valutare il funzionamento dell'impianto di riscaldamento associato ad una caldaia è necessario raccogliere il maggior numero di informazioni sui modelli disponibili e per offrire la miglior alternativa di pompa di calore bisogna, ugualmente, valutare le diverse opzioni sul mercato. Per questo motivo, vengono creati due database distinti, uno dedicato alle caldaie e l'altro alle pompe di calore. Per quest'ultima tecnologia, è necessario integrare un'ulteriore banca dati, contenente i profili di temperatura delle diverse località italiane. Le prestazioni delle pompe di calore, infatti, sono strettamente influenzate dalle condizioni climatiche esterne, rendendo i due database fortemente interconnessi. Assieme alle informazioni di temperatura, all'interno del database climatico vengono inserite, per ogni località, i dati di irradiazione annuale. Tali valori saranno necessari, in seguito, per il calcolo del numero di pannelli fotovoltaici da installare per soddisfare il fabbisogno elettrico della pompa di calore.

3.1 - Database caldaie

3.1.1 - Caldaie tradizionali e a condensazione

Prima di procedere con la costruzione del database vero e proprio, si svolge un'analisi sulla differenza tra le caldaie tradizionali e a condensazione. Nella fase di inserimento dati, l'utente deve saper indicare a quale tipologia appartiene la macchina installata.

La caldaia tradizionale è un'apparecchiatura che produce energia termica attraverso un processo di combustione, solitamente utilizzando come combustibile o il metano o il gasolio o il GPL. Di questi, il gas naturale è il più diffuso per la sua ampia disponibilità e convenienza economica [15]. Tuttavia, in aree non servite dalla rete di distribuzione del metano, si utilizzano il GPL (gas di petrolio liquefatto) o il gasolio, che presentano lo svantaggio di dover essere accumulati in appositi serbatoi, anziché essere immediatamente bruciati come accade per il metano fornito tramite tubazioni.

Il principio di funzionamento delle caldaie tradizionali è il seguente. La combustione del combustibile genera calore che riscalda l'acqua circolante all'interno di uno scambiatore, detto serpentina. L'acqua riscaldata o viene distribuita attraverso il sistema di tubazioni domestiche per alimentare i radiatori, o altri terminali dell'impianto di riscaldamento, o viene utilizzata per produrre acqua calda sanitaria. I fumi prodotti dalla combustione vengono espulsi attraverso la canna fumaria, e il tiraggio può essere sia naturale che forzato. Nel tiraggio naturale, i fumi sono espulsi grazie alla differenza di densità tra i gas di scarico caldi e l'aria esterna, poiché i gas caldi, essendo meno densi, tendono a salire. Nel tiraggio forzato, invece, viene utilizzato un ventilatore per spingere i fumi verso l'esterno.

In base al metodo con cui viene prelevata l'aria necessaria alla combustione, le caldaie tradizionali si dividono in due categorie, a camera aperta e a camera stagna [16]. In quelle a camera aperta, l'aria necessaria per la combustione viene prelevata dall'ambiente circostante e i fumi di scarico vengono evacuati attraverso un tiraggio naturale. Questo tipo di caldaia, sebbene più economica, comporta una potenziale pericolosità, poiché una scarsa ventilazione dell'ambiente può portare all'accumulo di monossido di carbonio. Le caldaie a camera stagna, invece, prelevano l'aria dall'esterno mediante un tiraggio forzato, garantendo maggiore sicurezza e isolamento dagli ambienti interni.

Uno dei principali limiti delle caldaie tradizionali è la dispersione di energia. Infatti, parte del calore prodotto durante la combustione viene perso con i fumi di scarico, causando un rendimento massimo dell'85%. Questa tecnologia è stata messa fuori produzione dal 2015, in conformità alle normative europee sull'efficienza energetica e sulla riduzione delle emissioni inquinanti. Nonostante la dismissione delle caldaie tradizionali, molte abitazioni sono ancora dotate di queste apparecchiature, specialmente nelle aree rurali o in contesti meno modernizzati.

Le caldaie a condensazione rappresentano un'evoluzione tecnologica significativa rispetto a quelle tradizionali [17]. In queste ultime, i gas di scarico, dopo avere scaldato l'acqua delle tubature, vengono espulsi all'esterno attraverso la canna fumaria. Questi fumi raggiungono mediamente temperature superiori ai 120 °C e contengono grandi quantità di vapore d'acqua. Nelle caldaie a condensazione il calore contenuto nei fumi viene recuperato dallo scambiatore raffreddandoli. In questo processo, la temperatura dei

gas di scarico può scendere al di sotto della temperatura di rugiada. Quando questo avviene, il vapore contenuto nei gas di scarico condensa restituendo calore. L'energia recuperata, chiamata calore latente, viene ceduta al liquido che scorre nell'impianto di riscaldamento, solitamente acqua.

Grazie a questo sistema, la caldaia a condensazione richiede meno combustibile per generare la stessa potenza termica, con un rendimento che può arrivare fino al 110% se si considera il potere calorifico inferiore [18]. Il processo di recupero del calore consente di ridurre notevolmente il consumo energetico e, di conseguenza, le emissioni di gas serra e inquinanti come l'anidride carbonica, il monossido di carbonio e gli ossidi di azoto.

Le caldaie a condensazione funzionano in modo particolarmente efficiente nei sistemi di riscaldamento a bassa temperatura, come il riscaldamento a pavimento, dove l'acqua di ritorno ha temperature più basse, favorendo il processo di condensazione. Tuttavia, possono essere impiegate, seppur in maniera meno efficace, anche in impianti con radiatori tradizionali.

3.1.2 - Dati tecnici e parco caldaie

Come anticipato nei Capitoli precedenti, l'applicativo è indirizzato ad utenti non tecnici e quindi nel processo di inserimento dati non è possibile richiedere informazioni troppo specifiche. Per questo motivo, viene creato un database, dedicato alle caldaie attualmente presenti sul mercato, che includa tutte le caratteristiche tecniche necessarie al calcolo dei consumi energetici. Inserita la potenza installata nella propria abitazione, l'utente può ricercare tra i modelli di pari taglia all'interno del database quello corrispondente. Il parametro utilizzato per questa ricerca è denominato nelle schede tecniche potenza al focolare. Questa si misura in kilowatt [kW] ed è la quantità di energia termica che una caldaia può generare per unità di tempo attraverso la combustione del combustibile nel suo focolare. Prima di procedere, bisogna fare la seguente precisazione. Durante la fase di inserimento dati dell'applicativo, viene richiesta la tipologia di combustibile che alimenta la caldaia. Tuttavia, nel database saranno incluse esclusivamente le caldaie che utilizzano il metano come fonte di energia. Questa scelta è motivata dalla volontà di

concentrarsi sui modelli che operano con il combustibile più diffuso, considerato l'ampio numero di varianti disponibili.

Una volta selezionato il modello, l'algoritmo carica tutti i dati tecnici di quella particolare caldaia. In particolare, sono rilevanti i range della portata di combustibile e di quella dell'acqua. Il primo è cruciale per valutare se la quantità di calore che è possibile generare è sufficiente a garantire il fabbisogno termico e il secondo è uno dei parametri utilizzati per determinare il numero di corpi scaldanti necessari a fornire il carico termico richiesto. Entrambi questi valori si possono determinare a partire dalla potenza al focolare. Nel database, per ciascun valore di interesse vengono indicati sia il limite minimo che massimo che può essere raggiunto, questo perché risulta di maggiore interesse la capacità di adattamento e di flessibilità di una caldaia nel rispondere a variazioni della domanda. Di seguito vengono fornite le equazioni per determinare le portate:

- Portata di combustibile: è il rapporto tra la potenza al focolare $P_{focolare}$ e il prodotto del rendimento di combustione $\eta_{combustione}$, assunto pari al 99%, e il potere calorifero inferiore H_i , pari a $9,27 \frac{kWh}{Smc}$ per il gas metano.

$$\dot{m}_{combustibile} = \frac{P_{focolare}}{\eta_{combustione} * H_i} \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (1);$$

- Portata d'acqua: è il rapporto tra la potenza al focolare $P_{focolare}$ e la variazione di entalpia Δh dell'acqua all'ingresso e all'uscita dei termosifoni. Quest'ultimo valore dipende dalla pressione operativa del sistema e in generale le caldaie domestiche operano tra 1,2 e 1,5 bar [19]. In un classico sistema di riscaldamento, la temperatura dell'acqua di mandata e di ritorno dai radiatori è rispettivamente di 80°C e di 60°C. A queste temperature e a una pressione di 1,5 bar, il valore di entalpia dell'acqua di mandata è pari a $335,09 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ mentre quello dell'acqua di ritorno è $251,29 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{P_{focolare}}{\Delta h} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (2).$$

Per creare una banca dati efficace, è essenziale includere modelli rappresentativi per garantire una copertura completa e pertinente delle diverse esigenze e caratteristiche del mercato. Per offrire un'ampia varietà di soluzioni, i modelli scelti sono stati definiti in modo da differenziare i range di operatività delle diverse caldaie. Nel database vengono considerati solo alcuni marchi produttori di caldaie: Ariston, Ferroli, Immergas, Vaillant e Viessmann. Queste marche sono le soluzioni maggiormente diffuse sul territorio italiano.

In *Tabella 1* vengono rappresentati i dati tecnici di interesse di alcuni modelli. Nella prima colonna sono riportati i nomi commerciali di questi. Le caldaie che contengono le parole Alteas e Ariston sono prodotte da Ariston, quelli che presentano la parola BLUEHELIX da Ferroli, Victrix sono un marchio Immergas, EcoTec di Vaillant ed infine VITODENS di Viessmann. Nelle colonne denominate P_{focmin} e P_{focmax} sono presenti i valori della potenza minima e massima che la caldaia è in grado di generare. Le colonne m_{CH4} contengono i valori massimi e minimi della portata di combustibile ed infine quelle denominate m_{H2O} contengono i valori massimi e minimi della portata d'acqua.

Modello	P_{focmin} [kW]	P_{focmax} [kW]	m_{CH4min} [Smc/h]	m_{CH4max} [Smc/h]	m_{H2Omin} [kg/s]	m_{H2Omax} [kg/s]
VITODENS 222-W B2LF	1,8	29,9	0,20	3,26	0,021	0,357
Alteas One+ Net 24	2,6	22	0,28	2,40	0,031	0,263
VICTRIX 28 TT	2,8	24	0,31	2,62	0,033	0,286
BLUEHELIX SUBLIME 28C	2,9	24,5	0,32	2,67	0,035	0,292
EcoTec pure	7,5	24	0,82	2,62	0,089	0,286
Ariston CLASS X CF	11	25,8	1,20	2,81	0,131	0,308

Tabella 1

Le caldaie VICTRIX e quella EcoTec, come spiegato in precedenza, sebbene siano in grado di generare una potenza massima al focolare pari a 24kW, hanno diverse potenze minime al focolare. Durante l'installazione di una caldaia, la scelta tra un modello e l'altro dipenderà dalla flessibilità di potenza richiesta. Il modello VITODENS 222-W B2LF risulta invece quello con un range operativo maggiore.

3.1.3 - Regolazione della temperatura di mandata

Uno dei requisiti richiesti per accedere all'applicativo è che i terminali dell'impianto di riscaldamento siano dei radiatori. Questi possono essere realizzati in diversi materiali, ghisa, alluminio, acciaio e si differenziano l'uno dall'altro in base alla capacità di conservare il calore. Quelli di ghisa possiedono una maggiore inerzia termica rispetto a quelli di alluminio ed acciaio, che si riscaldano e raffreddano molto più velocemente. Esistono anche altre soluzioni per erogare la potenza termica, una di queste è installare un impianto di riscaldamento a pavimento con pannelli radianti. La principale differenza tra le due tipologie di terminale è la temperatura di mandata dell'acqua. Questo valore si assesta tipicamente sui 70°C/80°C per i radiatori e all'incirca 40°C per il sistema a pavimento. Quest'ultimo cede calore in una modalità più uniforme ed efficiente poiché distribuita per tutta la superficie della pavimentazione e non in singoli punti come accade con i tradizionali radiatori a parete [20]. Questo scambio avviene tramite il fenomeno fisico dell'irraggiamento per il sistema a pavimento e non per convezione come per i radiatori.

La temperatura dell'acqua di mandata nell'impianto di riscaldamento è un tema di particolare importanza. Il valore impostato non deve essere né troppo alto né troppo basso. Se è troppo elevato, si determinano maggiori perdite di calore attraverso le linee di distribuzione ed è probabile che i consumi per il riscaldamento aumentino. Se invece i valori sono troppo bassi il comfort termico non viene garantito. Inoltre, anche la temperatura di ritorno dai terminali ha una certa rilevanza. Per le caldaie a condensazione, più il valore è basso, maggiore sarà la quantità dei fumi che condensano, incrementando la resa termica della caldaia. Inoltre, a parità di potenza termica da trasferire all'ambiente, se la differenza tra la temperatura di mandata e quella di ritorno è elevata può circolare meno acqua attraverso l'impianto. Al contrario, se la differenza di temperatura è molto bassa, il contenuto energetico del fluido è minore, quindi la portata deve aumentare e di conseguenza anche i consumi elettrici della pompa di circolazione dell'impianto.

Si consideri, a fine di esempio per dimostrare l'influenza della temperatura di mandata, un radiatore in acciaio Florian Plus, che deve mantenere la temperatura di un ambiente pari a 20°C. La temperatura di mandata dell'acqua è pari a 70°C mentre quella di ritorno

è uguale a 50°C. Secondo la Norma EN442-2 [21], l'equazione che determina la potenza termica scambiata dal radiatore con l'ambiente è:

$$Q_{(\Delta t)} = Q_n * \left(\frac{\Delta t}{50}\right)^n \quad (3)$$

Dove $Q_{(\Delta t)}$ è l'emissione calorifica al Δt desiderato, Q_n è l'emissione calorifica corrispondente a $\Delta t = 50^\circ C$ (condizioni normali), Δt è il salto termico, ovvero la differenza tra la temperatura media nel radiatore e quella ambiente, e n è l'esponente della curva caratteristica del radiatore. Dalla scheda tecnica del radiatore, risulta che il valore di Q_n sia pari a 1058W mentre quello dell'esponente uguale a 1,327. Prima di procedere al calcolo della potenza termica da scambiare, sono necessari dei passaggi intermedi. Bisogna prima calcolare la temperatura media nel radiatore:

$$t_m = \frac{t_e + t_r}{2} = \frac{70 + 50}{2} = 60^\circ C \quad (4)$$

Dove t_e è la temperatura di mandata e t_r quella di ritorno. Infine si ottiene il salto termico con la seguente:

$$\Delta t = t_m - t_a = 60 - 20 = 40^\circ C \quad (5)$$

Dove t_a è la temperatura ambiente. A questo punto è possibile calcolare la potenza termica scambiata dal radiatore che risulta essere:

$$Q_{(\Delta t)} = Q_n * \left(\frac{\Delta t}{50}\right)^n = 1058 * \left(\frac{40}{50}\right)^{1,327} = 788 W \quad (6)$$

Per calcolare infine la portata, utilizzando l'applicazione miniREFPROP [22] è possibile calcolare i valori di entalpia dell'acqua a 70°C e 50°C ad una pressione di 1,5bar, rispettivamente $h_{70^{\circ}\text{C}} = 293,16 \text{ kJ/kg}$ e $h_{50^{\circ}\text{C}} = 209,46 \text{ kJ/kg}$. La portata risulta pari a:

$$Q_{H_2O} = \frac{Q_{(\Delta t)}}{h_{70^{\circ}\text{C}} - h_{50^{\circ}\text{C}}} * \frac{3600}{1000} = 33,89 \text{ l/h} \quad (7)$$

Se invece la temperatura di mandata fosse stata pari a 65°C e quella di ritorno uguale a 55°C, questi valori sono stati scelti in modo tale da avere la stessa temperatura media nei radiatori e quindi la stessa potenza termica scambiata dell'esempio precedente, i risultati sarebbero i seguenti:

$$t_m = \frac{t_e + t_r}{2} = \frac{65 + 55}{2} = 60^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

$$\Delta t = t_m - t_a = 60 - 20 = 40^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

$$Q_{(\Delta t)} = Q_n * \left(\frac{\Delta t}{50}\right)^n = 1058 * \left(\frac{40}{50}\right)^{1,327} = 788 \text{ W} \quad (10)$$

$$h_{65^{\circ}\text{C}} = 272,22 \text{ kJ/kg} \quad (11)$$

$$h_{55^{\circ}\text{C}} = 230,37 \text{ kJ/kg} \quad (12)$$

$$Q_{H_2O} = \frac{Q_{(\Delta t)}}{h_{80^{\circ}\text{C}} - h_{60^{\circ}\text{C}}} * \frac{3600}{1000} = 67,78 \text{ l/h} \quad (13)$$

Dai risultati dei due esempi precedenti sono possibili le seguenti osservazioni. A parità di potenza termica scambiata, ad una temperatura di mandata più alta corrisponde una minore portata rispetto al caso che prevede una temperatura di mandata più bassa. Inoltre, ad una temperatura di mandata più alta, corrisponde, a parità di temperatura media nel radiatore, una temperatura di ritorno più bassa e questo, di conseguenza, implica anche un rendimento maggiore per le caldaie a condensazione.

Si rende quindi evidente che regolare la temperatura di mandata risulti fondamentale per contenere i consumi. Ad oggi, esistono diversi metodi per regolarla e i più diffusi sono quello a punto fisso e quello a curva climatica.

La regolazione a punto fisso è il sistema più semplice ed il suo principio di funzionamento si basa sul mantenimento della temperatura di mandata ad un valore costante preimpostato [23]. È normalmente costituito da:

- una centralina elettronica;
- una sonda di temperatura di mandata;
- un circuito idraulico per la regolazione della temperatura, tipicamente un circuito di miscelazione dotato di valvola miscelatrice.

Il valore a cui si vuole mantenere la temperatura di mandata viene impostato direttamente sulla centralina elettronica, la quale comanda la valvola miscelatrice con lo scopo di raggiungere e mantenere il set-point. La posizione di regolazione della valvola viene determinata in funzione della temperatura del flusso miscelato, misurata direttamente attraverso l'apposita sonda.

Questa strategia di regolazione presuppone di mantenere la temperatura di mandata dell'acqua ad un valore pari a quello necessario a garantire il comfort termico nel giorno più freddo dell'anno. Tuttavia, il limite è costituito dal fatto che la temperatura ambiente continua a cambiare ogni volta che si modificano le condizioni climatiche esterne. Uno strumento grafico molto efficace per mostrare la relazione tra la temperatura di mandata e quella esterna è il diagramma di regolazione. In questo caso, non essendoci alcuna correlazione con la temperatura esterna, il valore della temperatura di mandata è rappresentato da una semplice retta orizzontale. In *Figura 1* viene presentato un esempio coi valori tipici di mandata di un impianto a radiatori, in blu, e un impianto a pavimento, in arancione.

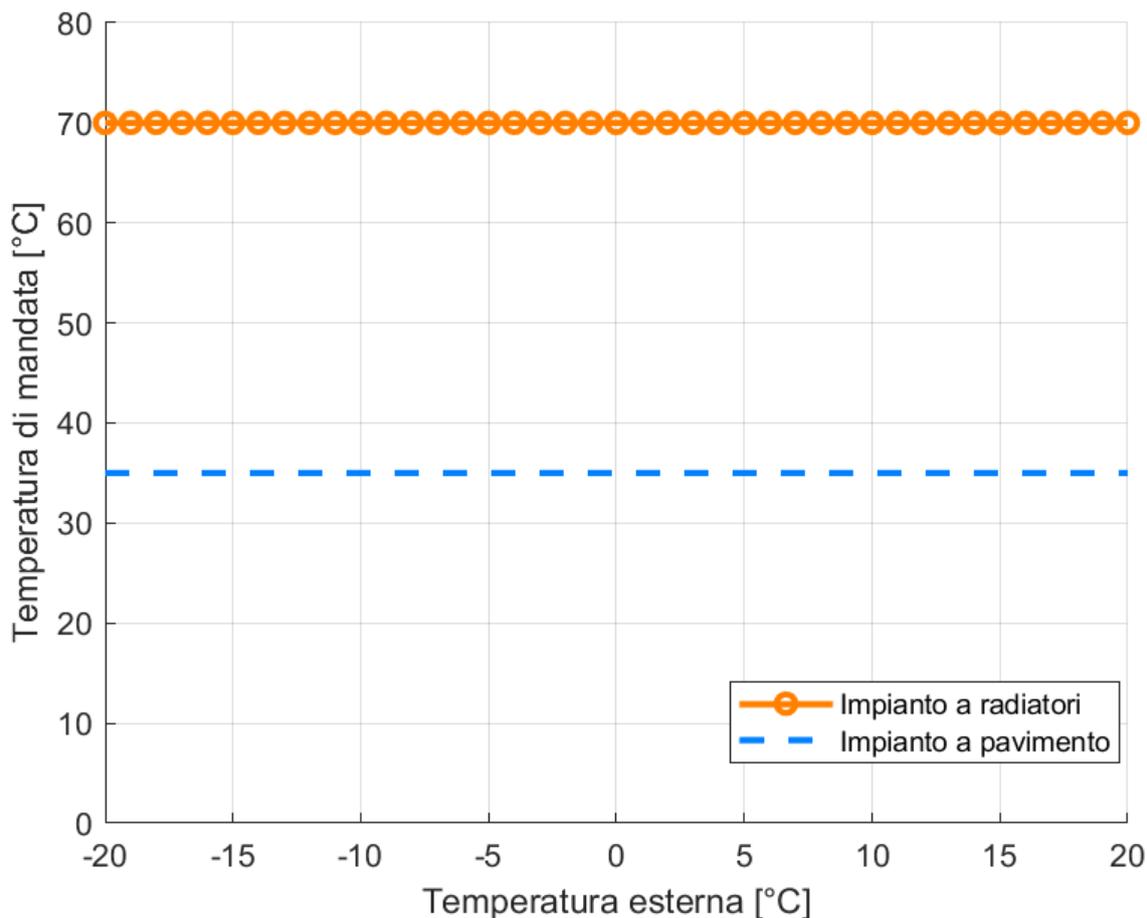


Figura 1 Diagramma di regolazione a punto fisso

Uno dei requisiti dell'applicativo è che il sistema di regolazione della caldaia domestica sia a punto fisso. Nonostante questa limitazione, in questo e nei prossimi Capitoli, verrà analizzato anche il sistema a curva climatica. Questo, attualmente, è quello maggiormente diffuso ed è quindi caratteristico di tutte le caldaie a condensazione di ultima generazione.

Questa tipologia di regolazione si basa sul fatto che il fabbisogno termico è proporzionale alle dispersioni dell'edificio ed è quindi condizionato dalla temperatura esterna. La temperatura di mandata viene quindi regolata in base alle effettive condizioni climatiche. In questo caso, il sistema di regolazione è costituito dagli stessi elementi del precedente, ai quali si va ad aggiungere una sonda di temperatura esterna, solitamente posizionata sulla parete Nord dell'edificio.

La temperatura di mandata si ricava dalla curva climatica in funzione della temperatura esterna, misurata attraverso la relativa sonda. Tale curva viene impostata nella centralina e

può normalmente essere modificata a seconda delle esigenze specifiche e del tipo di impianto. La centralina calcola quindi continuamente la temperatura di set-point al variare delle effettive condizioni climatiche e regola, di conseguenza, la valvola miscelatrice.

Questa strategia di regolazione risulta essere la più efficace, dato che riesce a garantire il miglior comfort ambiente adeguandosi costantemente alle condizioni climatiche esterne. Tuttavia, va posta particolare attenzione alla programmazione della curva climatica a seconda della tipologia di impianto e soprattutto delle caratteristiche dell'edificio. In questo caso, il diagramma di regolazione viene costruito a partire dai punti estremi: il valore della temperatura di mandata massimo viene impostato in corrispondenza della minima temperatura esterna e, viceversa, la temperatura di mandata minima corrisponde alla soglia di temperatura esterna per cui non vi è richiesta di potenza termica. La retta che unisce questi due punti rappresenta la curva più semplice, ma spesso si utilizzano anche tratti con diversa pendenza. In *Figura 2* vengono rappresentate due curve, quella in blu rappresenta i valori associati ad un impianto a radiatori mentre quella in arancione ad un impianto a pavimento.

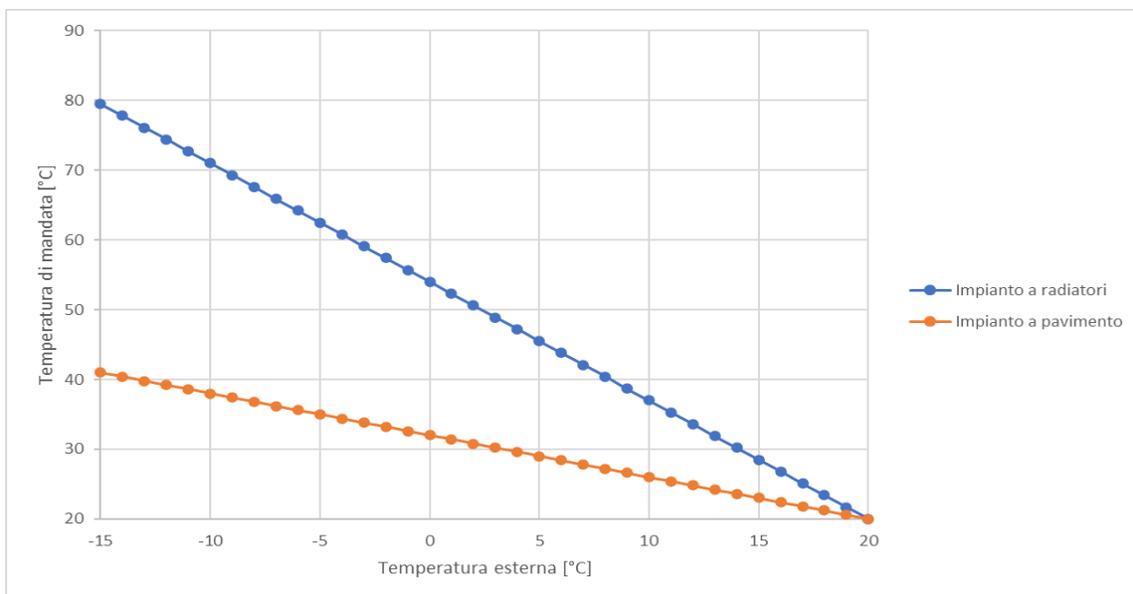


Figura 2 Diagramma di regolazione con la curva climatica

Nel processo di definizione di queste curve è fondamentale fare riferimento al Decreto del Presidente della Repubblica del 16 aprile 2013, n. 74, che nel suo articolo 3 stabilisce che durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione invernale, la media ponderata delle temperature dell'aria, misurate nei singoli ambienti riscaldati di ciascuna unità immobiliare, non deve superare $20^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C}$ di tolleranza per tutte le unità abitative. Di conseguenza quando la temperatura esterna supera i 20°C non è consentito l'utilizzo dell'impianto di riscaldamento.

Tutte le case produttrici forniscono, assieme alla scheda tecnica, degli esempi di grafici di regolazione per l'utilizzo ottimale delle caldaie prodotte. In alcuni casi, le curve climatiche sono presentate nella loro forma più semplice, ossia come semplici linee rette. È il caso delle caldaie Ariston, Immergas e Ferroli e il loro diagramma di regolazione viene raffigurato rispettivamente in *Figura 3*, *4* e *5*. Nei grafici sull'asse delle ordinate sono rappresentate le temperature di mandate, misurate in $^{\circ}\text{C}$, mentre sull'asse delle ascisse i valori della temperatura esterna, valutati in $^{\circ}\text{C}$. In ogni Figura è presente anche una legenda, in questa ogni curva è associata ad un numero. Questo valore non è da intendersi come la pendenza della retta, bensì è da considerarsi come un parametro interno all'azienda utilizzato per denominare le diverse curve.

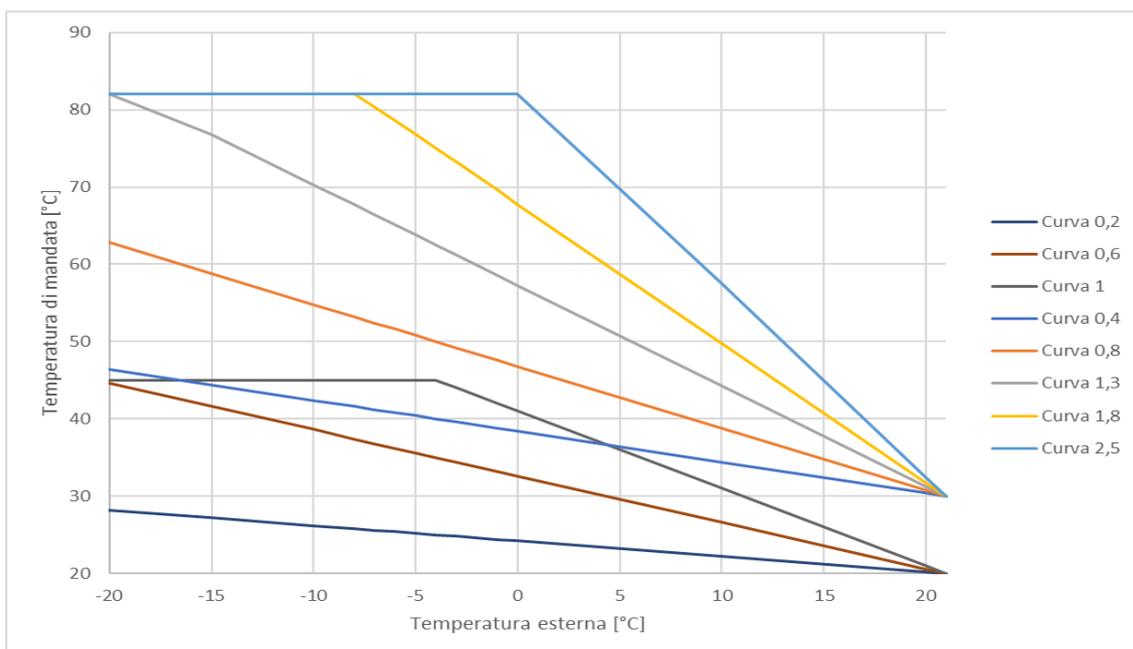


Figura 3 Curve Ariston

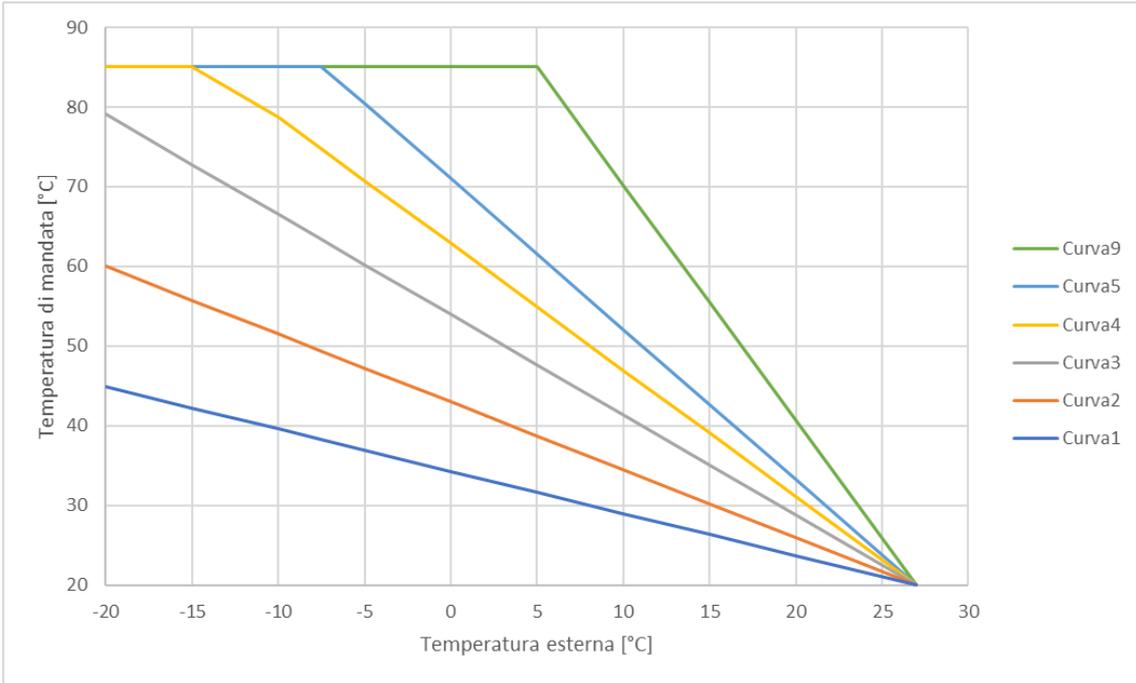


Figura 4 Curve Immergas

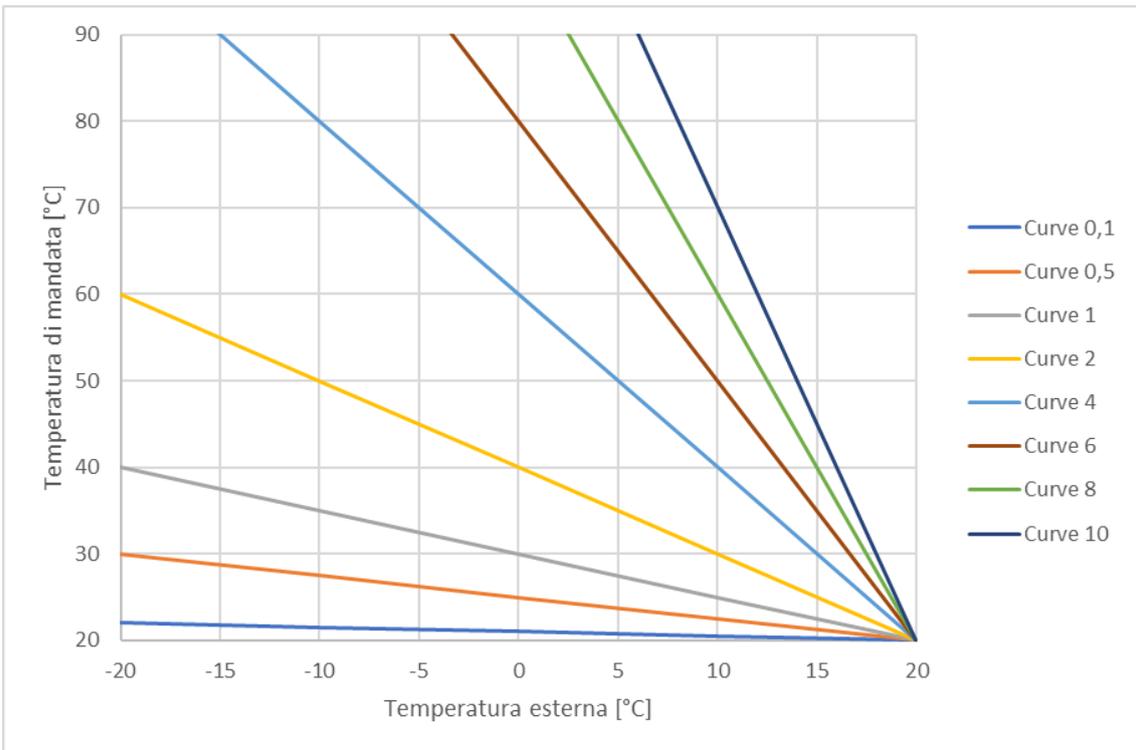


Figura 5 Curve Ferroli

Essendo delle semplici rette è bastato, dal grafico fornito, recuperare due soli punti per raffigurare la curva climatica. Uno è il punto di origine, comune a tutte le rette di un grafico. In base al produttore, il valore in ascissa di questo punto può cambiare, come si nota dai grafici è 21°C per Ariston, 27°C per Immergas e 20°C per Ferroli, mentre il valore in ordinata è comune a 20°C. In realtà è da fare una precisazione per la marca Ariston. Nel grafico sono presenti due tipologie di curve, quelle a bassa temperatura e quelle ad alta. Queste ultime hanno il valore minimo della temperatura di mandata pari a 30°C perché i modelli di caldaia in questione offrono rendimenti migliori a temperature più elevate e operare con valori inferiori comporterebbe una significativa riduzione dell'efficienza. Il valore in ascissa, invece, cambia di marca in marca semplicemente per raffigurare l'andamento con un diverso punto di origine. L'altro estremo che viene preso in considerazione corrisponde alla temperatura minima esterna e massima di mandata dell'acqua.

Non tutte le case produttrici di caldaie, però, forniscono dei diagrammi di regolazioni con delle semplici rette. Nelle schede tecniche delle marche Vaillant e Viessmann, le curve climatiche assumono una forma parabolica.

Per ottenere questa tipologia di curva non bastano più due punti, bensì bisogna ottenerne tre. Oltre i due punti già citati per le curve climatiche a forma di retta, il terzo viene recuperato dal grafico per "convenienza". Dalla scheda tecnica, si individuano quei punti dai quali risulta più semplice estrapolare i valori di ascissa e di ordinata.

A partire da questi tre punti e dall'equazione generale della parabola, mettendo tre equazioni a sistema, è possibile ottenere i valori dei coefficienti a , b e c .

$$y = ax^2 + bx + c \quad (14)$$

Dove y è la temperatura di mandata e x è la temperatura esterna. In *Figura 6* viene presentato il diagramma di regolazione tipico delle caldaie Viessmann.

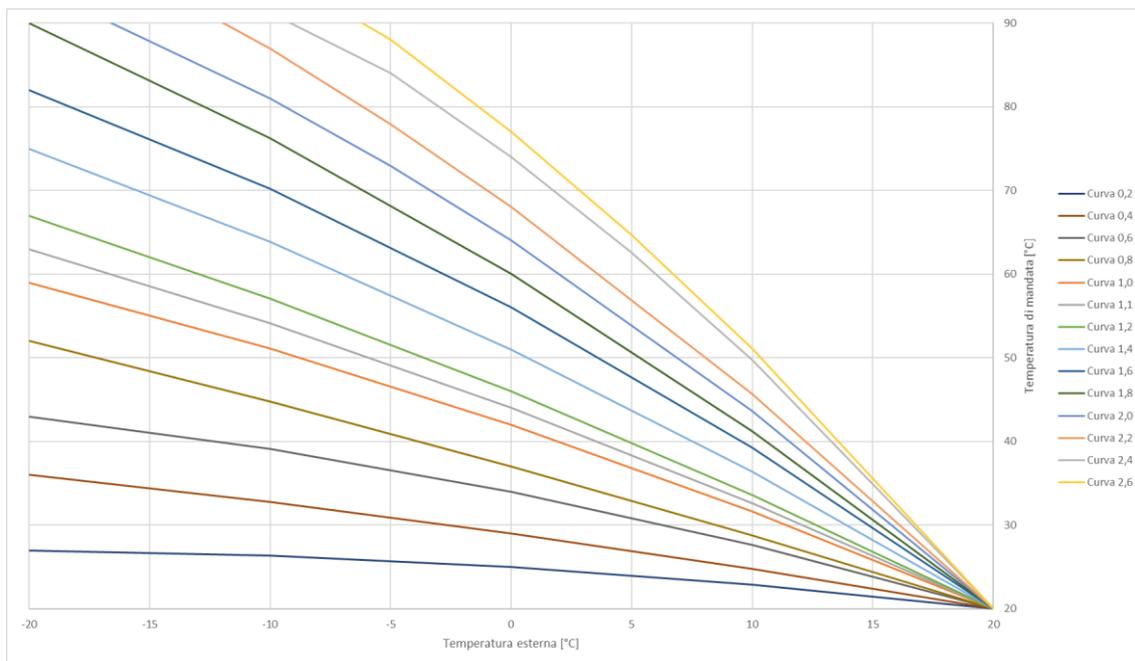


Figura 6 Curve paraboliche

Come si può osservare da questa e dalle precedenti Figure, i diagrammi contengono diverse curve. La scelta di una, rispetto ad un'altra, dipende dalla rapidità con cui la temperatura di mandata aumenta in relazione alla diminuzione della temperatura esterna, in modo da adattarsi ad uno specifico impianto e garantire il comfort termico richiesto. Nel caso di Viessmann le curve con una denominazione compresa tra 0,2 e 0,8 vengono utilizzate per impianti di riscaldamento a pavimento, quelle da 0,8 a 1,6 per impianti a bassa temperatura, infine quelle da 1,6 a 2,0 per impianti ad alta temperatura.

3.1.4 - Curva climatica universale

Come ripetuto più volte in questa tesi, l'applicativo lavora al momento solo con le caldaie a punto fisso. In possibili sviluppi futuri del progetto, si potrebbe considerare di implementare un algoritmo che analizzi le prestazioni di una caldaia regolate tramite curva climatica. Da quanto visto finora, ogni casa produttrice sembrerebbe avere un proprio diagramma di regolazione, ma in realtà, per come sono state definiti, i valori della temperatura di mandata in funzione della temperatura esterna non cambiano da un produttore all'altro. Quelle raffigurate nei grafici precedenti sono solo degli esempi di curve climatiche. Se in fase di

installazione si stabilisce che ad una temperatura esterna di 20°C basta corrispondere una temperatura di mandata di 20°C per mantenere una temperatura interna di 20°C, una qualsiasi caldaia ha come origine quel punto. Lo stesso vale per il punto associato alla temperatura massima di mandata, e quindi alla temperatura minima esterna, perché il valore viene determinato in base al fabbisogno termico dell'edificio per mantenere il comfort. Dovendo quindi stabilire i due estremi in base alle richieste termiche dell'abitazione, le rette climatiche per due diverse caldaie risultano equivalenti.

Se per le curve climatiche a forma di semplice retta è possibile quindi individuare una curva comune, questa può ritenersi valida anche per descrivere l'andamento di una curva parabolica?

Per permettere questo confronto, a partire dai punti raccolti in fase di costruzione delle parabole del diagramma di regolazione delle caldaie Viessmann, si costruiscono anche delle curve climatiche a forma di retta. Partendo dagli stessi punti, si riesce facilmente a confrontare se i valori della temperatura di mandata dell'acqua per una figura geometrica crescono con la stessa velocità dell'altra al variare della temperatura esterna.

Si prenda, a titolo di esempio, la curva denominata 1,4. I tre punti utilizzati per trovare l'equazione delle figure geometriche sono i seguenti:

Temperatura esterna	Temperatura di mandata
20	20
0	51
-20	75

Tabella 2

Da questi si ottiene la seguente equazione per la parabola $y = -0,0088x^2 - 1,375x + 51$ mentre per la retta $y = -1,375x + 47,5$. La y rappresenta la temperatura di mandata mentre la x la temperatura esterna. Da queste equazioni è possibile ricavare il valore della temperatura di mandata per qualsiasi valore di quella esterna. In *Tabella 3*, vengono quindi confrontati i risultati ottenuti utilizzando una curva climatica lineare e una parabolica. Nell'ultima colonna viene confrontata la differenza percentuale tra i valori ottenuti con i due diversi metodi.

Temperatura esterna	Temperatura di mandata		Differenza percentuale
	Lineare	Parabolica	
20	20,0	20,0	0,0
16	25,5	26,8	4,7
12	31,0	33,2	6,7
8	36,5	39,4	7,5
4	42,0	45,4	7,4
0	47,5	51,0	6,9
-4	53,0	56,4	6,0
-8	58,5	61,4	4,8
-12	64,0	66,2	3,4
-16	69,5	70,8	1,8
-20	75,0	75,0	0,0

Tabella 3

Come si può osservare, i risultati ottenuti dalla funzione lineare differiscono solo di pochi punti percentuali rispetto a quelli generati dall'equazione parabolica. Per questo motivo, si considera equivalente l'utilizzo di una curva piuttosto che l'altra per descrivere l'andamento della temperatura.

In *Figura 7* e *8*, a seguito di questa assunzione, vengono rappresentate rispettivamente le curve climatiche Viessmann e Vaillant sotto forma di rette.

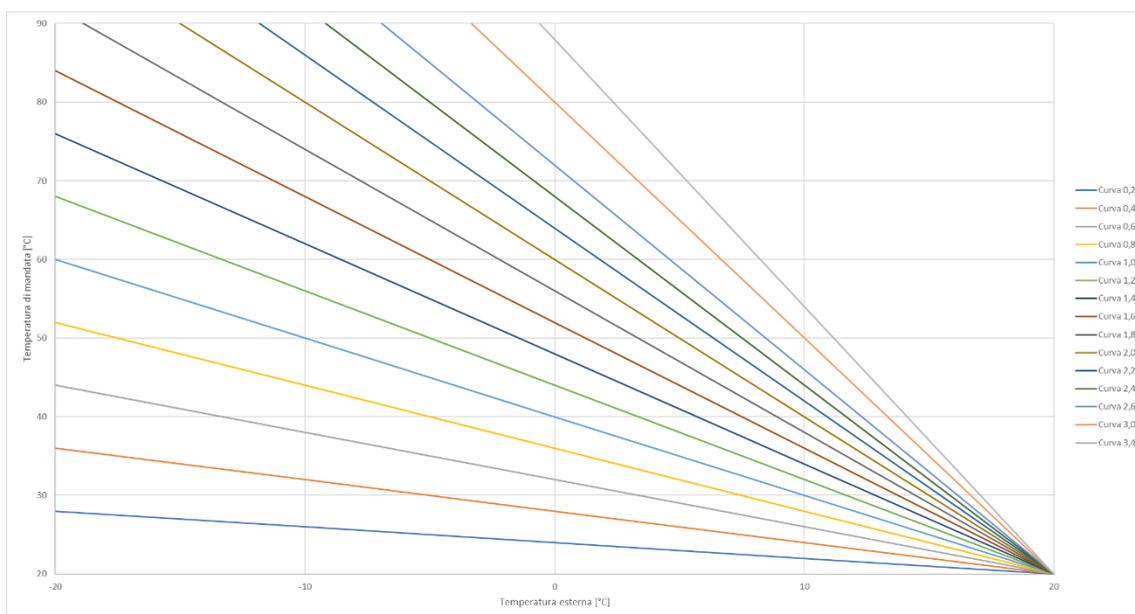


Figura 7 Curve Viessmann

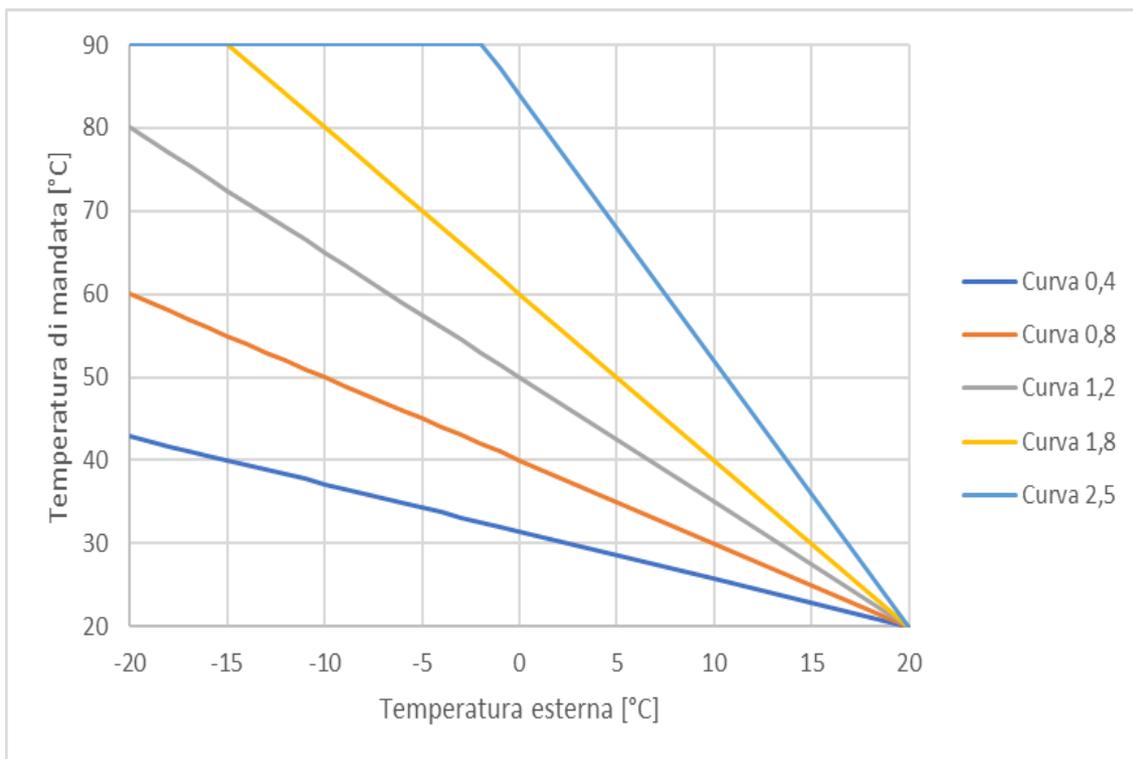


Figura 8 Curve Vaillant

Ritornando al quesito iniziale, la risposta è che risulta possibile adottare un'unica curva climatica, lineare, per tutti i diversi modelli di caldaie.

3.2 - Database pompe di calore

Nella fase di inserimento dati, l'utente non fornisce alcuna indicazione sulle pompe di calore in quanto è scopo dell'applicativo fornire come risultato un modello che possa soddisfare il fabbisogno termico richiesto in alternativa ad una caldaia. La creazione di un database dedicato, quindi, è necessario per avere a disposizione i dati tecnici al fine di valutare le prestazioni. I passaggi effettuati per la costruzione del database delle pompe di calore non saranno analizzati in questa tesi. Verranno, in seguito, presentati solo i dati tecnici riassunti all'interno della banca dati.

Per il calcolo delle prestazioni delle pompe di calore, i parametri fondamentali sono la potenza termica erogata e il COP, Coefficient of Performance, che è un valore che indica il rapporto tra la potenza erogata in modalità di riscaldamento e la potenza elettrica

assorbita dalla pompa. All'interno del database, vengono raccolti i valori appena citati di diverse taglie di pompe di calore disponibili sul mercato. Essendo che la taglia massima della caldaia è 35kW anche quella della pompa di calore massima non deve superare questo limite. Pertanto, vengono selezionati modelli con potenze che variano da un minimo di 4 kW fino a un massimo di 30 kW. I valori di COP e potenza termica vengono individuati a diverse temperature di mandata dell'acqua e al 100% del carico. In *Tabella 4* vengono riprodotti i valori per le pompe di calore di 4kW. Ogni riga corrisponde a una diversa temperatura di mandata (35°C, 45°C, 55°C). Per ciascuna di queste temperature, vengono indicati i valori minimi e massimi sia del COP che della potenza termica. Si noti che, al diminuire della temperatura di mandata, il COP aumenta ma la potenza termica prodotta diminuisce.

4 kW	COP		Potenza istantanea	
35	0,1359	3,9246	0,0683	4,4745
45	0,0998	3,0512	0,0792	4,4383
55	0,0781	2,4613	0,0782	4,1437

Tabella 4

Le pompe di calore sono dotate di due scambiatori di calore, uno cede calore all'ambiente da riscaldare, il condensatore, mentre l'altro, l'evaporatore, assorbe il calore dall'ambiente esterno (aria, acqua o terreno). Secondo quanto riportato da Euroserver2018, nel biennio 2016-2017, le pompe di calore aria-aria, che sfruttano l'energia dell'aria esterna, sono state le più vendute nel mercato italiano, con circa 1.400.000 unità [24]. Al contrario, le pompe di calore aria-acqua hanno registrato circa 40.000 unità vendute, mentre quelle aria-terra appena 860. Dati alla mano, all'interno del database vengono raccolti i parametri delle pompe di calore aria-aria, essendo la tecnologia maggiormente presente sul mercato.

3.3 - Database climatico

Il funzionamento delle pompe di calore aria-aria è quindi fortemente influenzato dalla temperatura esterna. Per valutare le prestazioni di questa tecnologia, è necessaria la creazione di un database climatico che contenga le informazioni di temperatura per ogni

località italiana. I valori assunti dalla temperatura esterna sono peraltro necessari al calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio.

Per questa analisi vengono considerati 8454 "comuni", anche se a livello amministrativo ce ne sarebbero 7904. Tuttavia, ad un comune possono essere associati CAP diversi e quindi vengono considerate come diverse località due zone della stessa città ma con codice di avviamento postale differente. Le strade percorribili per la creazione di questo database sono diverse. La strada più semplice sarebbe prendere i dati di temperatura di un singolo anno e svolgere l'analisi su di essi. Tale via però non risulta percorribile in quanto le prestazioni della pompa sarebbero troppo legate all'andamento di temperatura dell'anno campione. Se esso fosse un anno particolarmente rigido, i consumi della pompa sarebbero sovrastimati, mentre se l'anno fosse più mite sottostimati. Ad esempio, se si fosse scelto il 2023, a causa del cambiamento climatico in atto, potrebbero esserci dei picchi anomali di temperatura o in generale una temperatura media maggiore. Inoltre, la temperatura di ogni località è influenzata da diversi fattori che non si ripetono ciclicamente ogni anno. Ad esempio, il 29 settembre 2007, in una determinata località, la temperatura esterna risulta essere 22°C mentre sempre il 29 settembre, questa volta però del 2012, a causa di un fronte temporalesco, la temperatura scende a 15°C. Quale delle due annate tenere in considerazione per analizzare le prestazioni di una pompa di calore?

Si rende quindi necessaria percorrere un'altra possibilità. Dati i valori di diverse annate di temperatura si potrebbe eseguire, per ogni giorno dell'anno, una semplice media giornaliera tra le diverse temperature nei vari anni campione. Questa via avrebbe potuto limitare l'influenza di una singola annata ma potrebbe non risultare ancora sufficiente. Quanti anni prendere per ottenere un risultato accettabile? La soluzione adottata è diversa ancora e fa riferimento alla normativa UNI 10349-1 [25]. In estrema sintesi, la procedura fornisce il seguente risultato. Per ogni singola comunità vengono selezionati i dodici mesi migliori, ovvero i più rappresentativi, dal set di dati per ciascuno dei mesi civili. Quest'ultimo termine si usa per riferirsi ad un mese in generale (gennaio, febbraio, marzo, ecc.), quindi non un particolare gennaio, febbraio o marzo di un particolare anno.

Nei successivi paragrafi, viene analizzata la procedura proposta da tale norma per la costruzione di un profilo annuale caratteristico di temperatura per ciascuna località.

3.3.1 - Anno caratteristico e parametri principali e secondari

L'anno caratteristico è un anno formato da valori orari di parametri meteorologici appropriati, rappresentativi del clima a lungo termine. Si possono realizzare anni tipo per l'umidità, per le precipitazioni ma anche per altri parametri. Nel caso di interesse per la valutazione del rendimento di una pompa di calore, temperatura e velocità del vento sono i parametri chiave per i calcoli relativi al riscaldamento ed al raffrescamento degli edifici. Tali valori devono essere misurati in una località rappresentativa del clima di quella zona.

In questa analisi essendo che l'obiettivo ultimo è ottenere un profilo di temperatura caratteristico per ogni località, la temperatura a bulbo secco, indicata con la lettera p, sarà utilizzata come parametro principale per la selezione dei mesi migliori, mentre la velocità del vento come parametro secondario. La differenza tra le due è sostanziale e si capirà meglio nei prossimi paragrafi.

3.3.2 - Raccolta dati

Primo passo per la costruzione del database è la raccolta dei dati richiesti per poter seguire la procedura. La normativa prevede la costruzione dell'anno di riferimento a partire dai valori di temperatura di almeno dieci anni consecutivi. Essendo che il web tool vuole essere reso disponibile in tutta Italia, si rende necessario il reperimento dei dati per tutti i comuni italiani. A tal scopo, la migliore soluzione che permette di ottenere in maniera gratuita tutti questi valori, risulta essere il database fornito da OpenMeteo [26], una pagina web che mette a disposizione diversi dati climatici per ogni località. Per questione di disponibilità del sito, sono state considerati le annate dal 2010 al 2019. Data la grande mole di comuni presenti sul territorio italiano e di informazioni da recuperare, si è creato uno script Matlab che permettesse di automatizzare il processo di download. Tale codice carica una tabella nella quale sono presenti i nomi e le latitudini e longitudini di ogni comune italiano, ed in seguito, facendo riferimento a questa lista, richiede al sito web i dati di interesse per ogni paese/città. Una volta ottenuti i parametri climatici della temperatura e della velocità del vento, li salva in un file Matlab specifico per ogni località. Questi file contengono un unico vettore con due colonne, una per la temperatura e l'altra per la velocità del vento, e 87648 righe. Il motivo di un così elevato numero di righe, e di

conseguenza di valori, deriva dal fatto che il sito mette a disposizione i dati orari dei parametri di interesse.

3.3.3 - Suddivisione dei dati e calcolo delle medie giornaliere

Avendo svolto l'intera procedura su Matlab, si analizzano i passaggi eseguiti e il modo in cui sono stati elaborati i vettori durante la procedura. Il vettore a due colonne ottenuto da OpenMeteo [26] viene diviso in due vettori colonna, uno che contiene i dati della temperatura e l'altro esclusivamente quelli della velocità del vento. Ovviamente, questi vettori risultano ordinati dal punto di vista temporale, ovvero il primo valore è relativo al 1° gennaio 2010 mentre l'ultimo al 31 dicembre 2019. Il passaggio successivo è di riorganizzare entrambi i vettori, dividendo i dati nei rispettivi anni di appartenenza, quindi tutti i dati del 2010 vengono riuniti in un singolo vettore, quelli del 2011 in un altro ancora e così via. In questa fase inoltre, nel caso di anni bisestili, i valori di temperatura e velocità del vento relativi al 29 febbraio vengono scartati e non inseriti. In questo modo tutti i vettori conterranno lo stesso numero di elementi. Successivamente la procedura impone che si calcolino le medie giornaliere e si dividano i vari vettori anno in 12 vettori mesi. Si otterranno, per ogni annata, 12 vettori colonna con le medie giornaliere di ogni mese.

Le elaborazioni di seguito descritte verranno applicate soltanto al parametro principale, ovvero la temperatura. È opportuno, per semplificare il calcolo della seconda cumulata, parametro descritto nel Capitolo 3.3.5, ordinare le medie all'interno di ciascun vettore in ordine crescente. Inoltre, ad ogni vettore viene aggiunta un'ulteriore colonna identificativa. Tutti i mesi del 2010 avranno in questa colonna il numero 1, tutti quelli del 2011 il 2 e così via fino al 2019. Questa aggiunta servirà in particolare nel calcolo della prima cumulata, parametro descritto nel capitolo 3.3.4. Entrambe le aggiunte semplificano il procedimento di calcolo di una delle due cumulata ma non inficiano nel calcolo dell'altra.

Per quanto riguarda il calcolo della prima e della seconda cumulata i passaggi che verranno descritti, saranno validi soltanto per i vettori contenenti i dati di temperatura mentre i vettori relativi alla velocità del vento saranno ripresi soltanto nella fase finale della procedura nella scelta del mese migliore.

3.3.4 - Calcolo della prima cumulata

Successivo passaggio della normativa è quello di calcolare per ogni mese civile la curva di distribuzione cumulata empirica delle medie giornaliere di un certo mese in tutti gli anni del set di dati. La funzione di ripartizione empirica, o per l'appunto distribuzione cumulata, è un concetto fondamentale nella statistica inferenziale [27]. Essa permette di analizzare e rappresentare graficamente la distribuzione dei dati osservati, di valutare la forma e di individuare eventuali deviazioni dalla norma. Tale funzione fornisce una stima della distribuzione di probabilità dei dati osservati. La funzione di ripartizione empirica è particolarmente utile per analizzare dati non parametrici, cioè dati che non seguono una distribuzione specifica come per appunto i dati climatici.

Per calcolare la funzione di ripartizione empirica si eseguono i seguenti passaggi:

- si crea, per ogni mese, un unico vettore che contiene tutte le medie giornaliere di temperatura di un determinato mese civile, ad esempio viene creato un vettore del mese di marzo contenente tutti i dati dei vettori di marzo delle diverse annate, quindi saranno presenti i dati del 2010, 2011, 2012 e così via. Su Matlab vengono quindi uniti i vettori precedentemente creati, si ricorda che tali vettori dispongono di due colonne, nella prima sono presenti i valori di temperatura ordinati in modo crescente mentre nella seconda dei numeri identificativi dell'anno a cui appartengono tali dati;
- ottenuto tale vettore, si dispongono le medie giornaliere in ordine crescente, formando così una graduatoria;
- si assegna ad ogni valore un "rango", cioè il numero intero che rappresenta la sua posizione nella graduatoria, quindi si crea una terza colonna nella quale al valore minore, che si troverà nella riga 1 del vettore, sarà assegnato il rango 1, al dato in seconda posizione verrà assegnato rango 2 e così via;
- si calcola la prima cumulata, indicata come $\Phi(p, m, i)$, dove p rappresenta la temperatura, m il mese civile considerato e i è il valore i -esimo di media giornaliera del mese considerato, ovvero, ad esempio, se si sta calcolando il valore che assume la funzione di ripartizione per il 15 febbraio, i assume come valore 15:

$$\Phi(p, m, i) = \frac{K(i)}{N+1} \quad (15)$$

dove $K(i)$ è il “rango” dell’ i -esimo valore di media giornaliera del mese considerato. Il valore di Φ , minore o uguale a 1 per definizione, viene aggiunto per ogni riga in una quarta colonna. Nella formula, inoltre, al denominatore si trova il parametro N che è pari al numero di righe del vettore che comprende tutto il set, negli svariati anni, di dati di un mese. Ovviamente tale numero è uguale tra tutti i mesi che hanno lo stesso numero di giorni, quindi per i mesi di 30 giorni tale parametro assume il seguente valore

$$N = n^{\circ}_{giorni} * n^{\circ}_{anni} = 30 * 10 = 300; \quad (16)$$

- infine, da ogni vettore mese contenente tutti i dati delle diverse annate, vengono estratti e riuniti in un vettore tutti i valori di uno specifico mese civile. Quindi viene ad esempio ricreato il vettore corrispondente a settembre 2015, estraendo i valori dal vettore contenente tutti i valori dei diversi mesi di settembre tramite la colonna identificativa assegnata precedentemente. Nel nuovo vettore, la posizione dei diversi giorni rimane la stessa del vettore antecedente al calcolo della prima cumulata. Se prima di riunire in un unico vettore tutti i dati relativi ad uno specifico mese il giorno 21 settembre del 2014 era in quindicesima posizione, dopo il calcolo della prima cumulata e la successiva estrazione, tale giornata rimarrà sempre nella medesima posizione. Questa evidenza risulta fondamentale per il calcolo della statistica di Finkelstein-Schafer.

In *Figura 9* viene rappresentata la distribuzione cumulata empirica del mese di gennaio del comune di Sedegliano (UD), mentre in *Figura 10* quella del mese di giugno sempre del comune di Sedegliano (UD). In entrambe le Figure, viene rappresentato il valore che assume la funzione di ripartizione empirica, sull’asse delle ordinate, in funzione della temperatura, sull’asse delle ascisse. In ambedue i casi, come indicato dalle legende presenti, viene raffigurato l’andamento in diversi anni. È presente un’ulteriore curva raffigurata in colore rosso che non rappresenta alcun mese civile specifico, bensì l’andamento del vettore contenente tutti i dati dei diversi mesi di gennaio/giugno considerati nell’analisi.

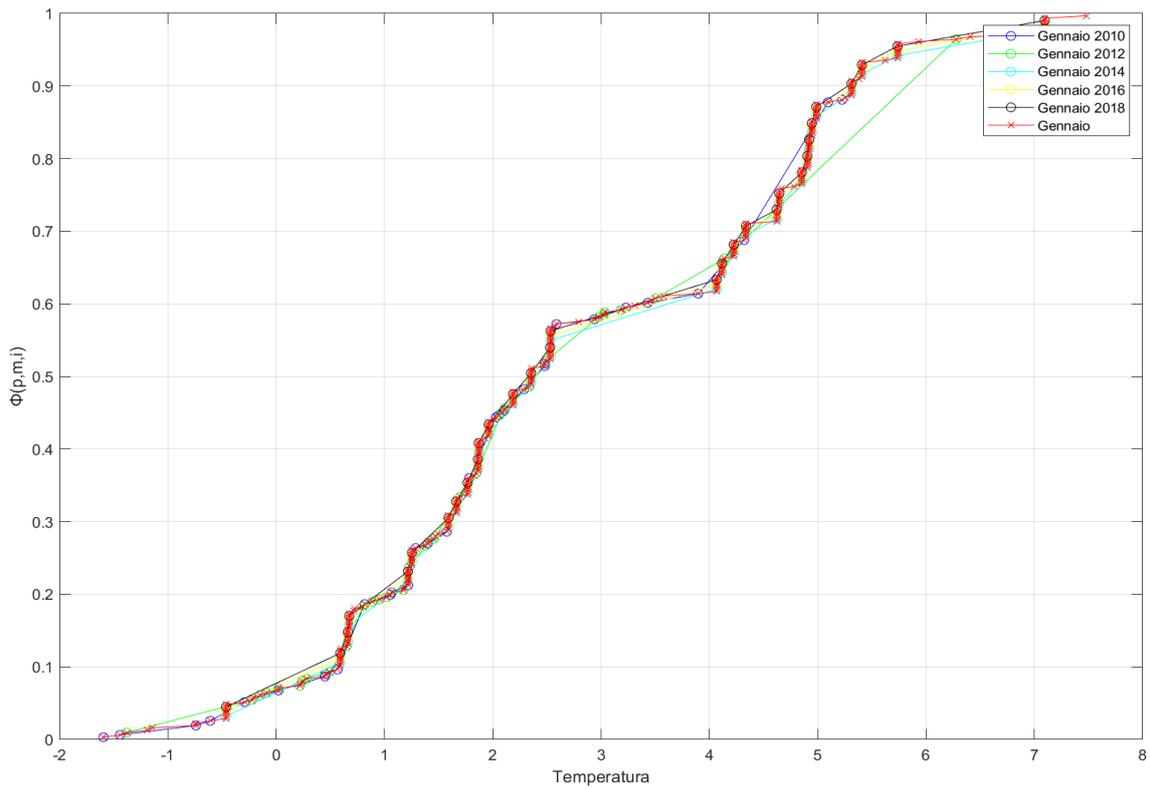


Figura 9 Andamento curva prima cumulata per il mese di gennaio

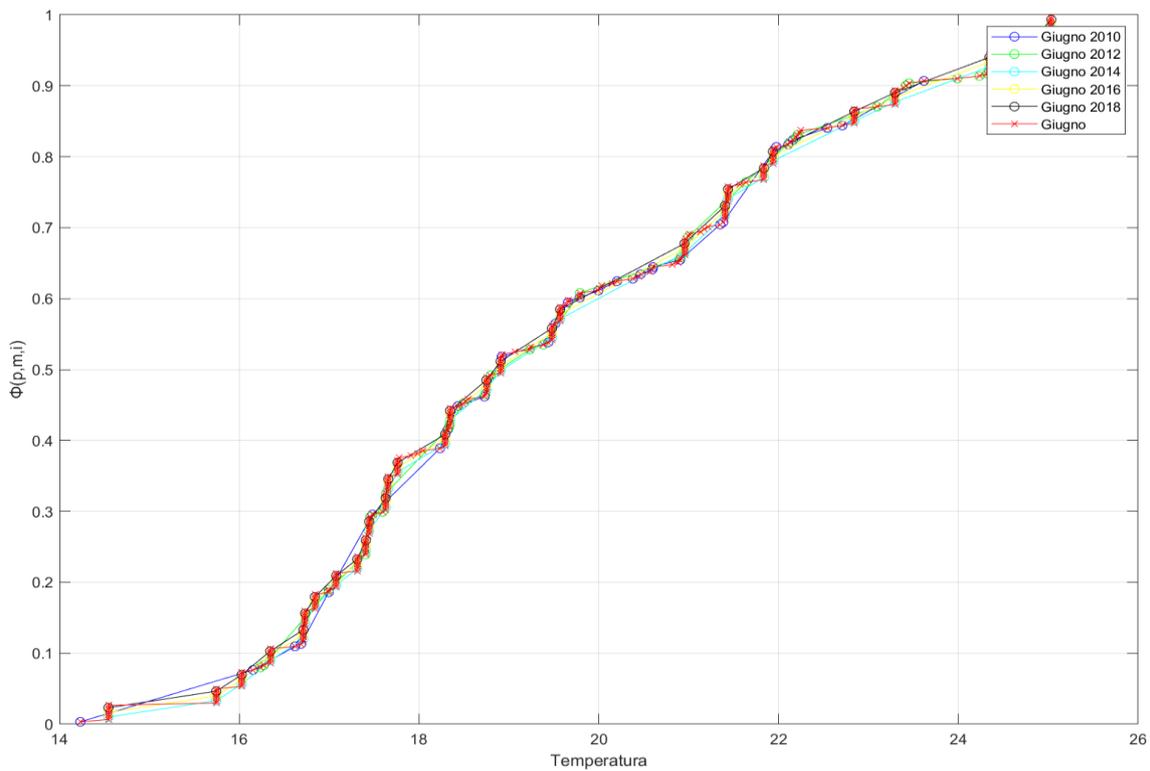


Figura 10 Andamento curva prima cumulata per il mese di giugno

3.3.5 - Calcolo della seconda cumulata

Prossimo passaggio indicato dalla normativa riguarda il calcolo per ogni anno della curva di distribuzione cumulata empirica delle medie giornaliere per ogni mese di calendario. La differenza rispetto alla prima cumulata è che ora la funzione di ripartizione viene calcolata in maniera indipendente sui vettori contenenti i dati di ogni singolo mese e non più su un unico vettore contenente tutti i valori. Per il calcolo si procede coi seguenti passaggi:

- si considera il vettore iniziale con i valori medi giornalieri di uno specifico mese già ordinati in modo crescente, in questo modo si è già ottenuta una graduatoria;
- si assegna, in una terza colonna, ad ogni valore un “rango”, cioè il numero intero che rappresenta la sua posizione nella graduatoria, ovvero il numero di riga;
- si calcola quindi la seconda cumulata, indicata come $F(p, y, m, i)$ dove p rappresenta la temperatura, y l’anno del mese considerato, m il mese civile considerato e i è il valore i -esimo di media giornaliera del mese considerato:

$$F(p, y, m, i) = \frac{J(i)}{n+1} \quad (17)$$

dove $J(i)$ è il “rango” dell’ i -esimo valore di media giornaliera del mese e dell’anno considerato. Il valore di Φ , minore o uguale a 1 per definizione, viene aggiunto per ogni riga in una quarta colonna. Al denominatore si trova invece il parametro n che rappresenta semplicemente il numero di giorni del mese civile considerato.

In *Figura 11* viene rappresentata la distribuzione cumulata empirica del mese di gennaio e in *Figura 12* quella del mese di giugno sempre del comune di Sedegliano (UD). In entrambe le figure, viene rappresentato il valore che assume la funzione di ripartizione empirica, sull’asse delle ordinate, in funzione della temperatura, sull’asse delle ascisse. In ambedue i casi, come indicato dalle legende presenti, viene raffigurato l’andamento in diversi anni. A differenza del caso della prima cumulata, le curve tendono ad essere maggiormente distanziate l’una dall’altra. Il motivo è da ricercarsi dal diverso modo in cui viene attribuito il rango e al valore di n ed N nei due casi.

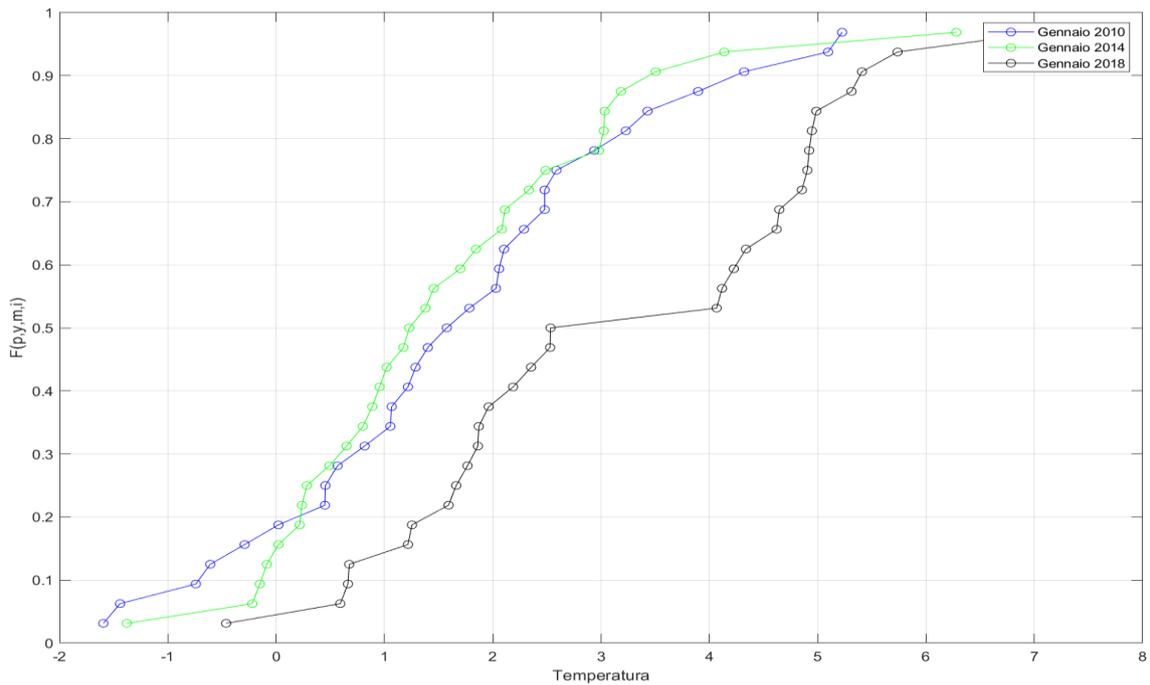


Figura 11 Andamento curve seconda cumulata per il mese di gennaio

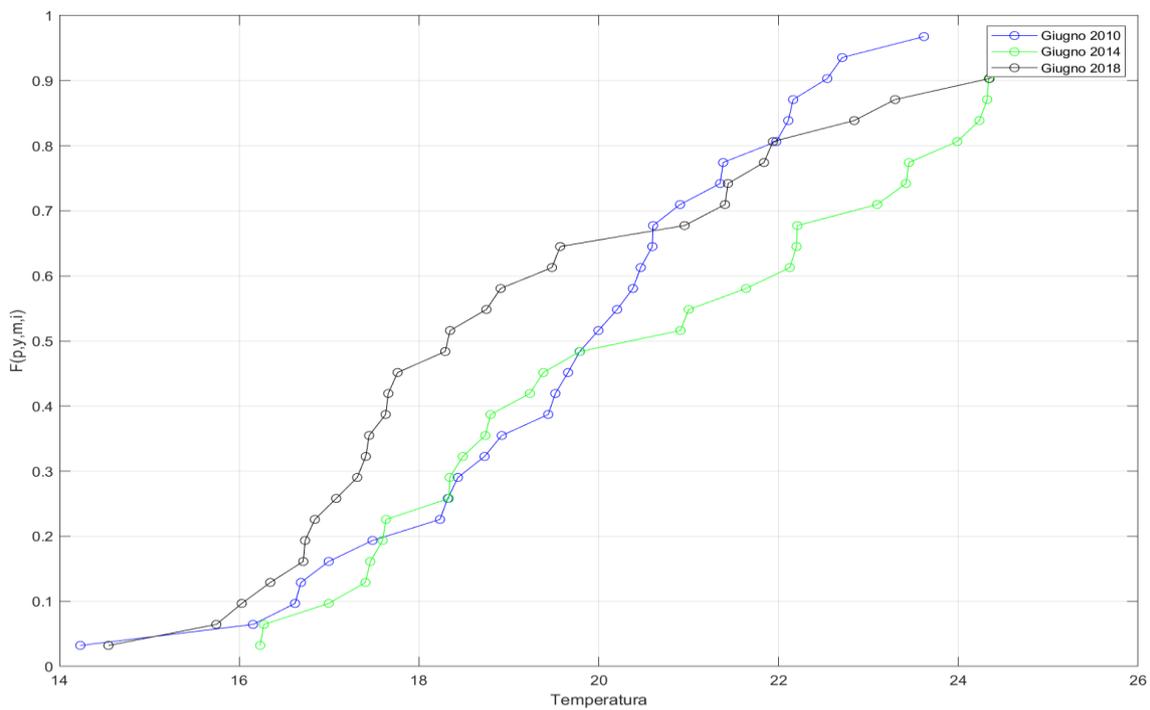


Figura 12 Andamento curve seconda cumulata per il mese di giugno

3.3.6 - Statistica di Finkelstein-Schafer

La normativa per la scelta dei mesi più vicini alla media impone l'uso della statistica di Finkelstein-Schafer, la quale infatti permette il confronto tra distribuzioni cumulate. Per ogni mese di ogni anno, si eseguono le seguenti operazioni:

- si calcolano dapprima gli scarti tra i due valori di frequenza calcolati ai punti precedenti:

$$\text{Scarto} = F(p, y, m, i) - \Phi(p, m, i); \quad (18)$$

- infine per il calcolo della statistica di Finkelstein-Schafer, indicata come $FS(p, y, m)$, per ogni mese di ogni anno, si sommano il valore assoluto di tutti gli scarti giornalieri:

$$FS(p, y, m) = \sum_{i=1}^n |F(p, y, m, i) - \Phi(p, m, i)| \quad (19)$$

Come anticipato durante la procedura di calcolo della prima cumulata, i due vettori che vengono sottratti sono stati costruiti in modo tale da avere uno specifico giorno di un determinato mese civile nella stessa posizione. Quindi se il vettore finale ottenuto dalla prima cumulata risulta avere in posizione (riga) "x" il giorno 21 del mese allora anche il vettore finale ottenuto dalla seconda cumulata avrà nella medesima posizione il valore del giorno 21 del mese.

3.3.7 - Ordinamento degli anni

Successivamente, la normativa impone di stilare, per ogni mese civile, una graduatoria degli anni in base al valore crescente della statistica di Finkelstein-Schafer. Si passa da 10 vettori a 10 singolari valori per ogni mese civile. A questo punto, questi "punteggi" vanno ordinati in ordine crescente e i mesi che risultano con i valori di FS più bassi sono quelli che più si avvicinano alla media, quindi quelli che hanno meno valori estremi. Si considerano come candidati per la costruzione dell'anno tipo, per ogni mese, i tre anni con la somma minore.

3.3.8 - Velocità del vento e presentazione anno caratteristico

Ultimo punto della procedura, per la scelta del mese caratteristico, per i tre anni candidati, si calcola la deviazione della media mensile di velocità del vento dalla corrispondente media dei valori di quel mese in tutti gli anni. Tale differenza viene calcolata in valore assoluto. Per ottenere la media mensile di velocità del vento si esegue semplicemente la media tra i valori di uno specifico mese. Per ottenere invece la media dei valori di uno specifico mese in tutti e tre gli anni, si uniscono semplicemente i tre vettori mese candidati in un unico vettore e poi si fa la media tra tutti i valori. Infine, tra i tre anni, si sceglie quello con il valore minore di deviazione come il miglior mese da includere nell'anno tipo.

Di seguito in *Figura 13 e 14*, vengono rappresentati i profili di temperatura del comune di Sedegliano (UD) per diverse annate per il mese di gennaio. In ambedue le Figure viene rappresentata in ordinata la temperatura mentre in ascissa il numero delle ore in maniera cumulata da inizio a fine mese. Si può notare la differenza tra le due immagini. Il mese di gennaio del 2010 è più simile al gennaio dell'anno tipo nei giorni centrali e finali mentre il gennaio del 2014 lo è nei giorni finali e iniziali del periodo considerato.

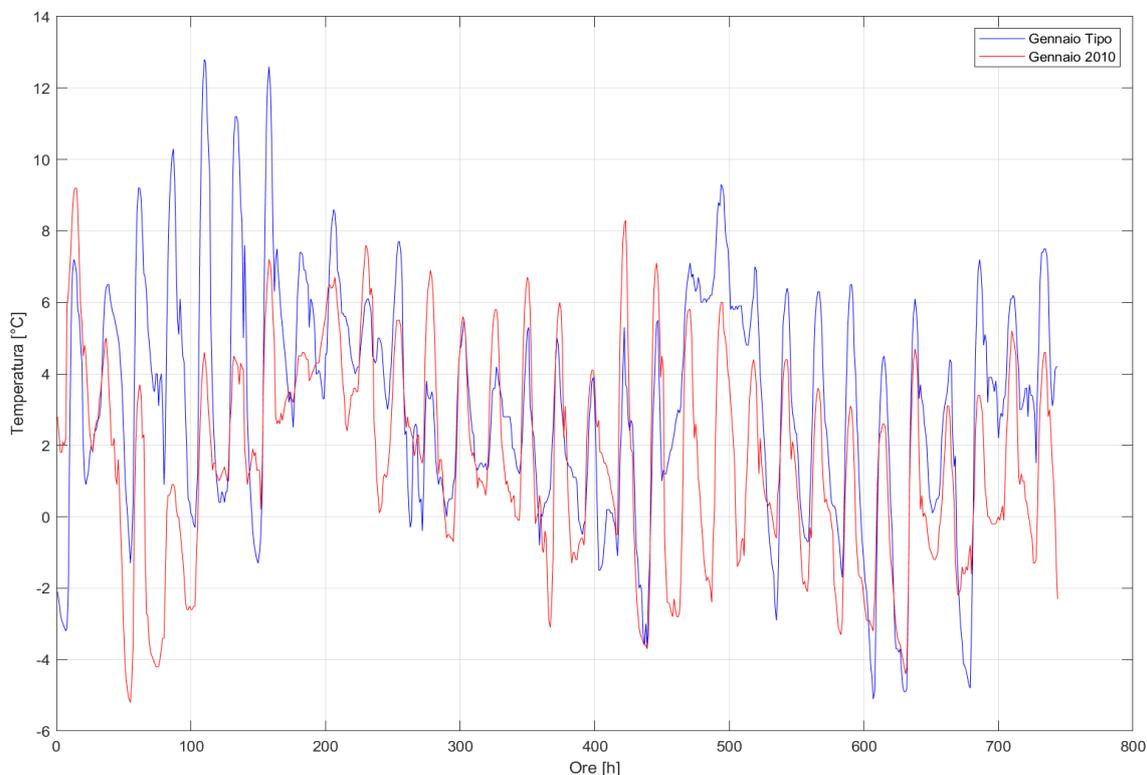


Figura 13 Andamento tra il mese di gennaio "tipo" e gennaio del 2010

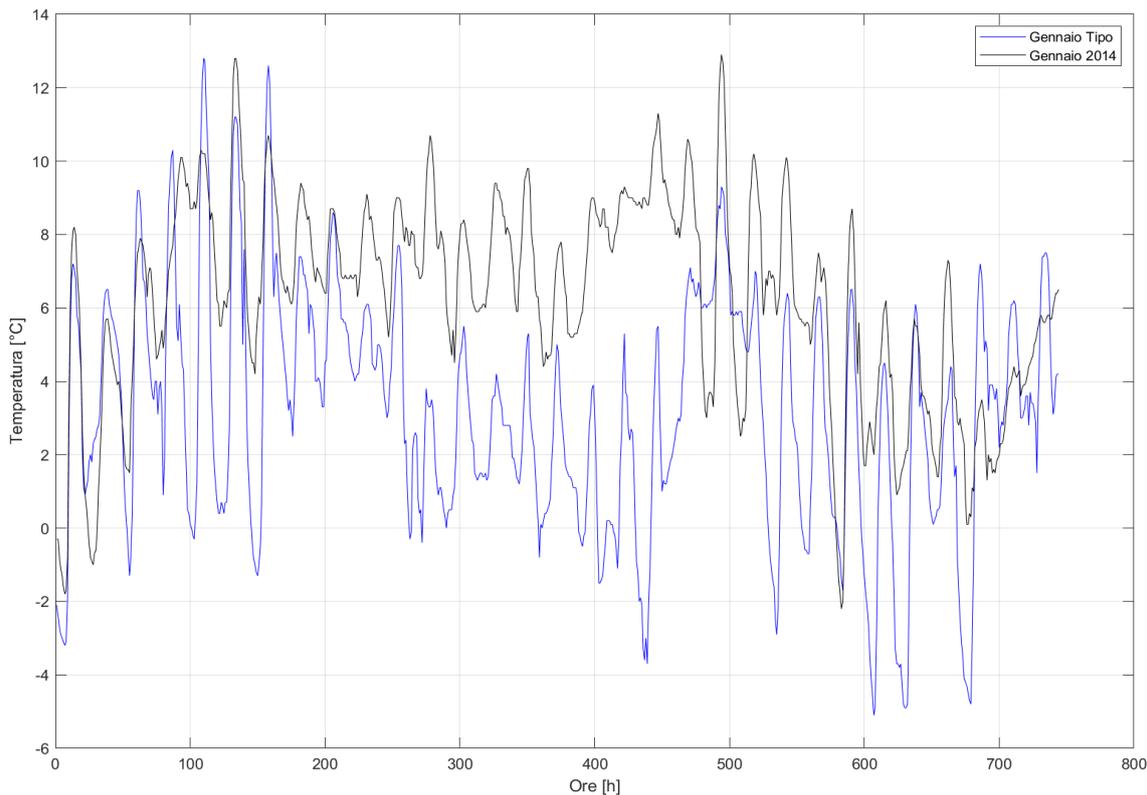


Figura 14 Andamento tra il mese di gennaio “tipo” e gennaio del 2014

3.3.9 - Anno caratteristico dell’irradiazione

In maniera analoga al parametro della temperatura, anche per la costruzione dell’andamento tipico dell’irradianza si segue la procedura precedentemente proposta. Tale parametro sarà fondamentale per il calcolo di uno degli output forniti dall’algoritmo, ovvero il numero di pannelli fotovoltaici da installare per soddisfare il fabbisogno elettrico della pompa di calore. In *Figura 15* e *16* viene raffigurato l’andamento del valore dell’irradianza nei mesi di gennaio e giugno per il comune di Sedegliano (UD).

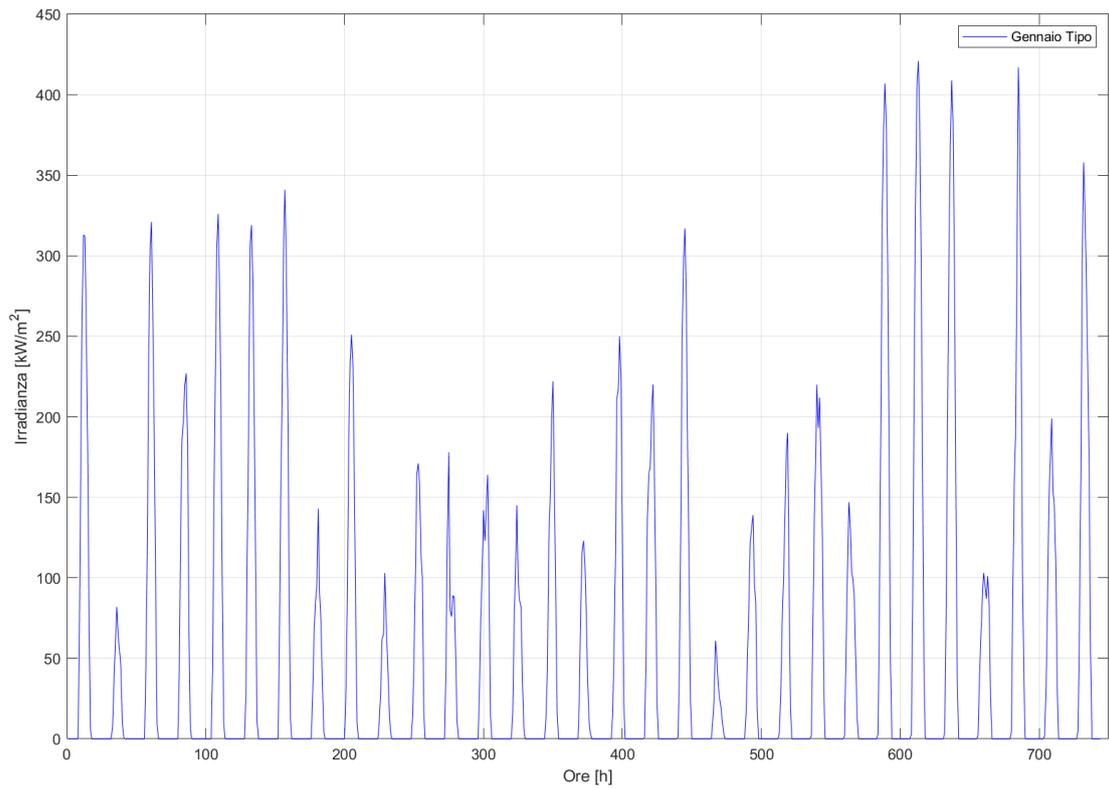


Figura 15 Andamento dei valori di irradianza per il gennaio "tipo"

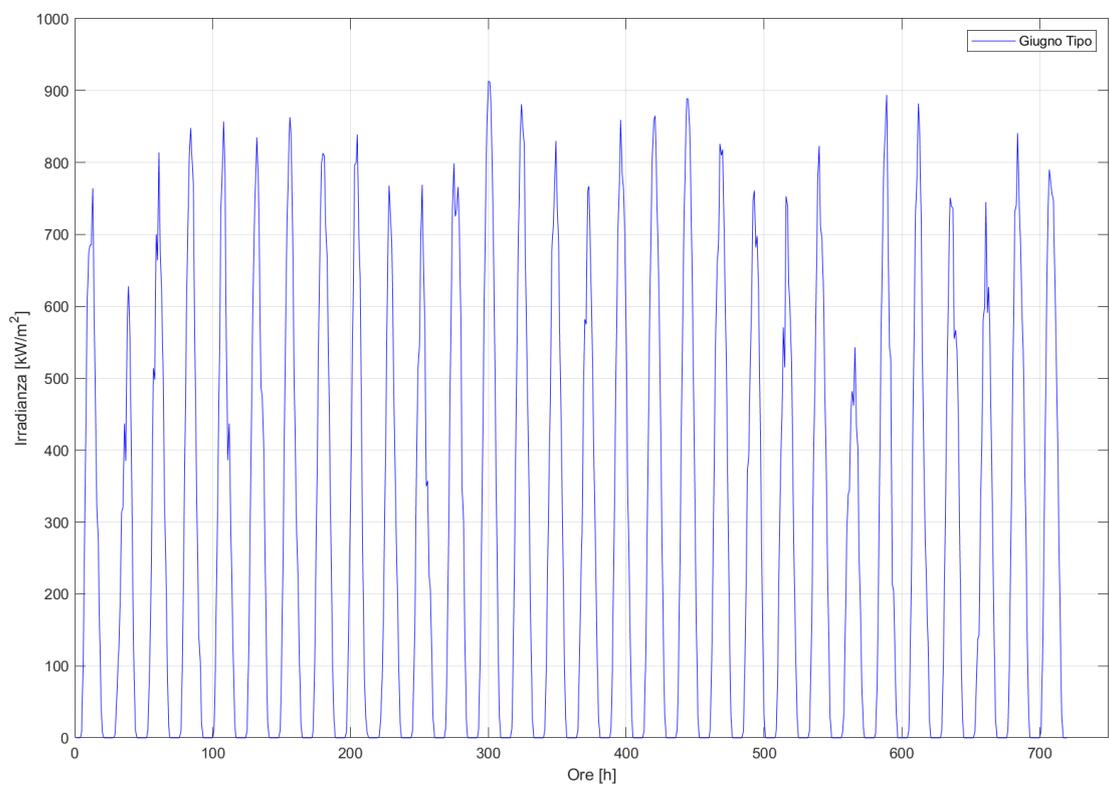


Figura 16 Andamento dei valori di irradianza per il giugno "tipo"

3.3.10 - Zone climatiche

Nella fase di inserimento dati, l'utente deve fornire il nome e il CAP del comune in cui l'immobile è situato. L'algoritmo a partire da questi dati recupera dal database climatico i valori di temperatura corrispondenti. Queste informazioni, però, non sono sufficienti per la valutazione dei consumi. Come verrà ampiamente spiegato in seguito nei prossimi Capitoli, l'algoritmo necessita infatti di inserire ogni località all'interno della fascia climatica di appartenenza. Le fasce climatiche sono una porzione di territorio con un determinato clima e solitamente anche con lo stesso tipo di flora e fauna.

Il territorio italiano è suddiviso, secondo il D.P.R n.412 del 26 agosto 1993, in 6 fasce climatiche nominate dalla A alla F in base alla temperatura media esterna giornaliera [28].

A seconda della zona climatica di appartenenza, in ogni comune italiano è regolamentato il periodo di accensione e spegnimento dell'impianto di riscaldamento, in particolare da che mese a che mese è consentito e anche per quante ore al giorno. Il decreto, inoltre, stabilisce le disposizioni per la progettazione, l'installazione, la gestione e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, con lo scopo di promuovere il risparmio energetico.

La classificazione delle fasce viene fatta tramite la misurazione dei gradi giorno (GG o gr-G) e non in base al luogo geografico, questi rappresentano un indice del clima e maggiore è questo numero e più freddo farà in quel determinato comune. I gradi giorno corrispondono alla somma della differenza in tutti i giorni dell'anno, tra la temperatura dell'ambiente interno e la temperatura media esterna giornaliera. In questa sommatoria vengono considerate soltanto le differenze positive, nel caso in cui queste siano negative si pone il valore pari a 0. Sempre secondo il D.P.R n.412 del 26 agosto 1993 la temperatura dell'ambiente interno è di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ in abitazioni, scuole e uffici mentre di 18°C per gli immobili adibiti ad attività artigianali e industriali [29]. La normativa che riferisce al calcolo dei gradi giorno è la norma UNI EN ISO 15927-6:2008:

$$GG = \sum_{e=1}^n (T_0 - T_e) \quad (20)$$

Dove:

- n è il numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento;
- T_0 è la temperatura ambiente convenzionale, fissata a 20°C ;
- T_e è la temperatura media esterna giornaliera.

Nel caso in cui $T_e > T_0$ la differenza è posta per normativa pari a 0.

Le categorie climatiche dei comuni italiani non sempre rispecchiano la loro collocazione geografica. Così, un paese del Nord e uno del Sud possono appartenere alla stessa fascia climatica, poiché hanno climi simili nonostante la differente latitudine.

Le sei fasce climatiche riconosciute in Italia sono:

- Zona A: comuni con gradi-giorno inferiori a 600 (è la zona con i climi più caldi);
- Zona B: comuni con gradi-giorno tra 600 e 900;
- Zona C: comuni con gradi-giorno tra 901 e 1400;
- Zona D: comuni con gradi-giorno tra 1401 e 2100;
- Zona E: comuni con gradi-giorno tra 2101 e 3000;
- Zona F: comuni con gradi-giorno superiori a 3000 (è la zona con i climi più freddi).

Nel seguente elenco verranno proposti alcuni comuni rappresentativi di ogni zona climatica, secondo la suddivisione dei comuni italiani introdotta dal D.P.R. n.412:

- Zona climatica A: Lampedusa, Linosa, Porto Empedocle;
- Zona climatica B: Agrigento, Catania, Palermo, Reggio Calabria, Siracusa, Trapani;
- Zona climatica C: Bari, Catanzaro, Cosenza, Latina, Lecce, Napoli, Salerno, Sassari, Taranto;
- Zona climatica D: Ancona, Firenze, Genova, Pescara, Pisa, Roma, Terni, Verona, Viterbo;
- Zona climatica E: Bologna, Bolzano, Enna, Milano, Padova, Sondrio, Trento, Treviso, Udine;
- Zona climatica F: Belluno, Cuneo.

Come anticipato, il Decreto stabilisce in base alla fascia climatica di appartenenza anche il periodo e gli orari di accensione consentiti, ovviamente le ore di funzionamento dell'impianto di riscaldamento non devono essere necessariamente consecutive:

- A: 1° dicembre – 15 marzo (6 ore giornaliere);
- B: 1° dicembre – 31 marzo (8 ore giornaliere);
- C: 15 novembre – 31 marzo (10 ore giornaliere);
- D: 1° novembre – 15 aprile (12 ore giornaliere);
- E: 15 ottobre – 15 aprile (14 ore giornaliere);
- F: nessuna limitazione.

I sindaci dei singoli comuni possono autorizzare l'accensione degli impianti di riscaldamento anche al di fuori dei periodi previsti per ciascuna zona, in caso di comprovate esigenze dovute a condizioni meteorologiche avverse. Tuttavia, in tali circostanze, l'accensione non potrà superare la metà della durata giornaliera consentita in via ordinaria.

Il periodo e l'orario di riscaldamento può tuttavia cambiare per decreto, ne è un esempio l'annata 2022/2023, per la quale con il decreto MITE 06.10.2022, il periodo di accensione degli impianti è stato ridotto di un'ora al giorno e il periodo di funzionamento della stagione invernale 2022-2023 è stato accorciato di 15 giorni, posticipando di 8 giorni la data di inizio e anticipando di 7 la data di fine esercizio. Inoltre, i valori di temperatura dell'aria sono ridotti di 1° C all'interno delle abitazioni [30].

4 – ALGORITMO DI CALCOLO

Come anticipato al Capitolo 2.1, il progetto di tesi verte sullo sviluppo del modello matematico che consenta di capire con calcoli semplici e poche informazioni se si può sostituire la caldaia domestica con una pompa di calore senza cambiare i corpi scaldanti e continuando a garantire il comfort termico.

Il modello matematico in questione è sviluppato utilizzando l'applicazione di programmazione Matlab. Il codice implementato deve emulare il comportamento del software finale che verrà fornito. Dovrà quindi interfacciarsi con l'utente e richiedere le informazioni di base e successivamente mischiare i dati di input a quelli presenti nei vari database creati per fornire il risultato finale.

Nei prossimi Capitoli verrà analizzata la struttura del modello matematico e i risultati da esso prodotti.

4.1 - Valutazione dati di input

Uno dei punti di forza dell'applicativo è che ha bisogno di poche, ma specifiche, informazioni per permettergli di funzionare. Come anticipato nel Capitolo 2.2, i dati necessari che l'utente deve inserire riguardano l'ubicazione dell'edificio, l'impianto di riscaldamento e le bollette di consumo del gas metano. Lo script funziona in maniera tale da interrogare l'utente per ognuna di queste informazioni. In base alla domanda, l'input inserito può essere di due tipologie, o un dato numerico o alfanumerico. La gestione di tali categorie è diversa, infatti la seconda dovrà essere convertita in un valore numerico. Per farlo si farà riferimento a delle tabelle di conversione.

Ricapitolando l'utente inserisce i seguenti parametri:

1. Comune di domicilio;
2. CAP comune di domicilio;
3. Orario accensione/spegnimento del riscaldamento (è contemplato un massimo di accensioni/spegnimenti pari a due nel corso dell'intera giornata);

4. Bollette del gas metano;
5. Potenza della caldaia;
6. Efficienza della caldaia (*);
7. Termostato installato (termovalvole, termostato singolo (per tutta la casa), un termostato per stanza);
8. Anno realizzazione impianto idraulico (dopo il 2000, tra il 1990 e il 2000, prima del 1990);
9. Tipologia impianto idraulico (utente singolo, centralizzato uno o più piani).

Per valutare in maniera corretta i consumi è fondamentale conoscere l'ubicazione della località dell'utente. Tale informazione viene fornita dai punti 1 e 2. L'algoritmo, basandosi su queste informazioni, è in grado di caricare il file Matlab in cui sono state salvate le informazioni sull'anno tipo dal database climatico relativo alla località di interesse. A partire da queste, sarà poi possibile il calcolo dei gradi giorno del comune così da collocarlo in una precisa fascia climatica. Come visto nel capitolo 3.3.10, conoscendo i valori di temperatura durante tutto l'anno è possibile il calcolo dei GG. Questa informazione, inoltre, permette di ottenere il periodo di riscaldamento e le ore di accensione concesse a quella determinata località. Il periodo di riscaldamento influisce nella gestione della bolletta, come si vedrà nel paragrafo successivo. Per quanto riguarda l'orario di funzionamento della macchina, esso influenza le prestazioni della pompa di calore. Se la temperatura esterna ad una certa ora risulta di 5°C, le prestazioni della pompa saranno migliori rispetto al caso di una temperatura esterna di -2°C. Infatti, in generale, con la diminuzione della temperatura esterna le prestazioni calano, in particolare in prossimità di 2°C c'è un rapido decremento causato dalla formazione di ghiaccio sullo scambiatore esterno. La pompa di calore è composta da due scambiatori, un condensatore che scambia calore con l'interno dell'abitazione ed un evaporatore che fa lo stesso ma con l'ambiente esterno. Quest'ultimo se lavora con una temperatura dell'aria che si trova vicino ai 2°C deve lavorare con un fluido frigorifero che si trova ad una temperatura inferiore. Di conseguenza la superficie può trovarsi sotto lo 0°C e l'acqua contenuta nell'aria ghiaccia, rendendo lo scambio di calore più difficoltoso.

Cuore pulsante dell'algoritmo sono i valori di consumo inseriti al punto 4. Tali dati permettono sostanzialmente di ottenere il fabbisogno termico orario necessario durante il

periodo di riscaldamento per l'abitazione, utile poi per il calcolo della firma energetica. Per semplificarne il conto, si assumono due ipotesi. Nella prima, il consumo mensile viene ripartito in maniera equa tra tutti i giorni del mese. Di conseguenza, se durante una giornata il riscaldamento non è entrato in funzione, risulta comunque che sia avvenuta produzione termica. Se il consumo di novembre è stato 300Smc allora il consumo giornaliero risulta di 10Smc. Al momento quindi i dati inseriti al punto 3 non vengono utilizzati dall'algoritmo. Per la seconda, il consumo di metano giornaliero, viene spalmato in maniera equa tra le diverse ore del giorno e non solamente nel periodo di accensione del riscaldamento. Ovvero se la caldaia è attiva dalle 08:00 alle 13:00 e impiega 240Smc di gas metano, tale consumo viene ripartito in maniera uguale durante tutte le ore del giorno, ovvero vengono utilizzati 10Smc l'ora. Ci sono altri aspetti da considerare per ottenere la produzione termica oraria e sono altamente legati ai dati di input dei punti precedenti. I dati di consumo di una bolletta comprendono sia il combustibile utilizzato per il riscaldamento sia quello per la produzione di acqua calda sanitaria che quello di utilizzo domestico, ad esempio in cucina per la cottura di cibi e bevande. Per il calcolo della firma energetica, tale strumento verrà ampiamente analizzato nel capitolo 4.2, i dati di consumo che interessano sono solo quelli riguardanti il riscaldamento. Si rende quindi necessario isolare da ogni bolletta tutto l'utilizzo di gas metano che non sia rivolto a tale scopo. Per fare ciò, a partire dalle bollette riferite al periodo estivo, da maggio a settembre, si esegue una media sui consumi e il risultato che si ottiene viene poi detratto dalle bollette dove l'impianto è funzionante. Giunti a questo punto, dalla bolletta scalata, non si può ancora dedurre il consumo orario. Infatti bisogna porre particolare attenzione a quei mesi nei quali inizia e finisce il periodo di riscaldamento. All'inizio del paragrafo si assume la divisione del consumo in maniera equa tra tutti i giorni del mese. Questo coincide a verità nel caso in cui tutti i giorni appartengano al periodo di riscaldamento. Diversamente, è importante conoscere la fascia climatica di appartenenza della località sotto studio. Prendendo come esempio una località in fascia climatica E, il periodo di accensione inizia il 15 ottobre e quindi il dato presente in bolletta non va diviso per 31 bensì per 16. Prima di ripartire i consumi, bisogna scolarli dalla media estiva e poi si può procedere. Risultato finale delle manipolazioni dei dati di consumo presenti in bolletta sarà un vettore che contiene tutti i dati orari di consumo.

I dati di input dal punto 5 al punto 9 sono utilizzati per calcolare la prestazione energetica dell'impianto di riscaldamento. Tale valore ha tre diversi contributi, uno dato dal

rendimento della caldaia installata, uno derivante dalla tipologia di termostato installato ed infine un ultimo influenzato dall'impianto idraulico. Questi dati di input non vengono inseriti dall'utente come valori numerici bensì come alfanumerici. Si rende necessario quindi riferirsi a delle tabelle di conversione fornite dalla letteratura.

Per quanto concerne il rendimento della caldaia a punto fisso, si fa riferimento alla normativa DPR 74/2013 allegato B [31]. Tale norma impone il rendimento minimo ammissibile in base alla data di installazione, alla tipologia di generatore di calore e alla potenza nominale. Da tale normativa si estrapola la seguente formula:

$$\eta_{boiler} = \eta_{combustione} + 2 \log P_n \quad (21)$$

Dove P_n è la potenza nominale della caldaia a punto fisso installata, $\eta_{combustione}$ è il rendimento della combustione e η_{boiler} il rendimento totale della macchina installata. Quest'ultimo valore viene utilizzato nel calcolo del rendimento totale dell'impianto di riscaldamento. Il valore del $\eta_{combustione}$ è legato al dato di input relativo all'efficienza della caldaia installata e in *Tabella 5* sono presenti le relazioni per convertire questo valore alfanumerico in un numero:

*	0,84
**	0,87
***	0,90
****	0,93

Tabella 5

Per quanto riguarda i rendimenti legati alla regolazione dell'impianto di riscaldamento $\eta_{regolazione}$ e all'impianto idraulico $\eta_{idraulico}$, i valori utilizzati fanno riferimento alla normativa UNI TS 11300 e sono riassunti rispettivamente in *Tabella 6* e *7* [32].

Le termovalvole, o valvole termostatiche, controllano il flusso di acqua di un termosifone e, di conseguenza, regolano la temperatura di un ambiente. Il termostato, invece, comanda la caldaia in base alla temperatura rilevata nella stanza in cui si trova e conseguentemente regola

la temperatura dell'acqua di riscaldamento di mandata. Ne consegue che la regolazione dell'impianto di riscaldamento effettuata tramite un termostato per stanza, la quale risulta migliore rispetto all'adottare un unico termostato per tutto l'edificio, è una soluzione più efficace rispetto alla possibilità di una gestione del flusso, e non della temperatura, effettuata dalle termovalvole. In *Tabella 6* vengono raccolti i valori per la conversione:

Termovalvole	0,80
Termostato singolo	0,88
Un termostato per stanza	0,93

Tabella 6

Per quanto riguarda l'efficienza dell'impianto idraulico, ci sono due parametri che influenzano il valore finale. Il periodo in cui tale impianto è stato costruito, più esso è datato più sarà soggetto all'invecchiamento e quindi a perdite, a corrosione o ad ostruzioni, di conseguenza il rendimento sarà minore, e la tipologia di edificio. L'impianto di una villetta singola (utente singolo), essendo dedicata esclusivamente al fabbisogno di un unico utente, avrà prestazioni migliori di un altro impianto che invece deve soddisfare le richieste termiche di differenti utenti in un unico edificio. Nonostante uno dei requisiti per accedere all'applicativo sia la presenza di un impianto di riscaldamento autonomo, lo script prevede anche la possibilità di gestire casi in cui il sistema sia centralizzato. Tuttavia, se si sceglie di utilizzare l'applicativo esclusivamente per un utente singolo, tutte le colonne della tabella relative al sistema centralizzato vengono semplicemente rimosse, senza alterare i valori esistenti. In *Tabella 7*, vengono riassunti i dati per la conversione degli input nel rispettivo valore di rendimento:

	Utente singolo	Centralizzato a un piano	Centralizzato a due piani	Centralizzato a tre piani	Centralizzato a quattro piani
Dopo il 2000	0,99	0,97	0,96	0,95	0,94
Tra il 1990 e il 2000	0,97	0,94	0,93	0,92	0,91
Prima del 1990	0,95	0,91	0,90	0,89	0,88

Tabella 7

Convertiti i tre contributi in valori numerici, è possibile ottenere il rendimento dell'impianto di riscaldamento moltiplicandoli:

$$\eta_{tot} = \eta_{boiler} * \eta_{regolazione} * \eta_{idraulico} \quad (22)$$

Questo risultato serve a tenere conto della dispersione termica dell'edificio nel calcolo del fabbisogno termico. Dalle bollette, come precedentemente discusso, è possibile ottenere il consumo orario di gas naturale. Per ottenere la potenza termica oraria richiesta dall'edificio bisogna moltiplicare il consumo per il potere calorifico del combustibile, nel caso del metano è pari a $10,94 \left[\frac{kWh}{Smc} \right]$. Il valore che si ottiene però rappresenta la quantità di energia lorda fornita all'edificio senza considerare che parte di questa viene dispersa. Per tenere conto di questo aspetto è quindi fondamentale moltiplicare la potenza termica oraria ottenuta dalle bollette per η_{tot} . Il risultato finale di questa manipolazione sarà un vettore che contiene i dati orari di potenza termica richiesta dall'edificio durante l'anno.

4.2 - La firma energetica

Come ampiamente ripetuto nei capitoli precedenti, lo scopo ultimo dell'applicazione è valutare le prestazioni di una pompa di calore in sostituzione ad una vecchia caldaia. Esistono varie taglie di pompe, ma quale scegliere come sostituto? Nei paragrafi precedenti viene spiegato come calcolare la potenza termica oraria, ovvero il fabbisogno termico richiesto. A partire da questi valori, è possibile estrarre dal database quella pompa che riesce a soddisfarli ma che al contempo non sia sovradimensionata e quindi lavori in gravi condizioni di off-design. Per raggiungere tale scopo è necessario il calcolo della firma energetica.

La firma energetica è un diagramma che permette di monitorare e documentare accuratamente i consumi energetici di un edificio [33]. Questo strumento grafico rappresenta i consumi tenendo conto delle variazioni climatiche esterne e rende possibile effettuare analisi e valutazioni dettagliate confrontando due curve, una, appunto, del fabbisogno e l'altra raffigurante la potenza istantanea prodotta dalla pompa. Ogni pompa

possiede una sua curva in quanto, al variare della taglia e del modello, le potenze a cui lavora sono diverse per la stessa temperatura esterna. Le due curve da confrontare hanno diversa pendenza e nel punto in cui si incontrano, chiamato anche balance point, ad una determinata temperatura, il fabbisogno richiesto è pari alla produzione della macchina. A tutte le altre temperature, se la curva della potenza è sopra quella del fabbisogno vuol dire che l'energia prodotta è maggiore di quella richiesta mentre se la curva è sotto vuol dire che la pompa non produce a sufficienza. Per una buona progettazione, l'ideale sarebbe che questo punto di incontro non sia alla temperatura minima in quanto la macchina sarebbe forzata a lavorare per la maggior parte del tempo a carichi parziali, bensì ad una temperatura che non sia troppo distante da quella minima e che lasci il fabbisogno termico insoddisfatto soltanto per poche ore durante l'anno. Solitamente in queste poche ore, la restante domanda di energia viene soddisfatta da altre fonti, come un piccolo boiler integrato. Tuttavia, l'ente mandante del progetto, ENEA, fornisce un'indicazione diversa sul come trattare il balance point. Infatti, decide di assumere che questo punto sia fissato alla minima temperatura esterna. L'intenzione, in linea con le politiche europee di rendere le abitazioni a zero emissioni entro il 2050, è di dover rinunciare all'installazione di ulteriori tecnologie di riscaldamento che possano emettere gas serra. Inoltre, tale decisione è motivata da un altro motivo. Uno dei risultati forniti all'utente è il numero di pannelli fotovoltaici da installare per coprire la domanda elettrica della pompa. L'idea è di invogliare l'utente a considerare una loro installazione, in questo modo, tutta l'energia è prodotta da fonti rinnovabili e anche se la macchina lavora a carichi parziali, e quindi con un minor rendimento, il problema dell'efficienza non è così grave.

La firma energetica si può stimare su base giornaliera, settimanale o mensile: in base alla scelta fatta il grafico finale risulta essere molto diverso.

A livello giornaliero, infatti, ci sono molte differenze tra un giorno e l'altro e non si tiene conto dell'inerzia dell'edificio. Con grafici mensili, invece, non sarà possibile rilevare le variazioni di consumo tipiche dei brevi picchi di temperatura e delle differenze tra giorni feriali e festivi o tra il giorno e la notte. Nel codice implementato su Matlab, la firma energetica verrà stimata su base mensile (i periodi di integrazione vanno di mese in mese) e per il calcolo saranno necessari solo due dati: i consumi effettivi, ossia il fabbisogno termico, e la temperatura esterna al momento della rilevazione. Da questa analisi verranno

quindi trovati i parametri che descrivono l'inclinazione e l'intercetta di questa curva. Di seguito sarà spiegata la procedura seguita.

Per il calcolo della firma energetica si definiscono due differenti periodi all'interno del periodo di riscaldamento, per semplicità la fine del primo coincide col 31 dicembre e l'inizio del secondo con il 1° gennaio mentre l'inizio del primo e la fine del secondo coincidono ovviamente con inizio e fine del periodo di riscaldamento. Successivamente, si procede con la risoluzione di un sistema costituito da due equazioni con la seguente forma:

$$-a \int_{ore} T_{esterna} dh + b * ore_{periodo} - \int_{ore} P_{oraria} dh = 0 \quad (23)$$

Dove $T_{esterna}[^{\circ}C]$ è il vettore dell'anno tipo di temperatura di una determinata località, $ore_{periodo}[h]$ sono il numero di ore all'interno del periodo considerato, $P_{oraria}[kW]$ è il vettore della potenza termica oraria netta, precedentemente calcolato, ed infine $a[\frac{kW}{^{\circ}C}]$ e $b[kW]$ sono i due parametri che descrivono inclinazione ed intercetta della retta raffigurante la firma energetica. Le due equazioni del sistema fanno entrambe riferimento a quest'ultima appena descritta, la differenza è data dal fatto che una sarà riferita al primo periodo di riscaldamento mentre l'altra al secondo. Di conseguenza i vettori temperatura e potenza oraria saranno ripartiti in base a questa divisione così come saranno calcolate il numero di ore comprese in ciascun intervallo di tempo.

Finalmente, risolto il sistema e ottenuti i valori di a e b , si procede con il calcolo della firma energetica [kW]:

$$firma\ energetica = -a * T_{esterna} + b \quad (24)$$

A questo punto è possibile dimensionare la taglia della pompa di calore. Come anticipato precedentemente, il balance point viene fissato alla temperatura minima e di conseguenza al valore massimo della firma energetica. Quindi per ottenere la giusta taglia, vengono

confrontati i diversi modelli presenti nel database. Oltre alle informazioni relative alla potenza prodotta, in questo archivio, per ogni taglia, sono stati caricati anche i coefficienti, precedentemente chiamati a e b , per permettere la costruzione della curva della potenza istantanea prodotta dalla pompa. Su Matlab viene creato un ciclo for che confronta alla retta della firma energetica quella di ciascun modello, viene confrontato uno per volta dal meno al più potente, e che smette di iterare quando trova la prima pompa con la capacità adeguata a soddisfare il fabbisogno termico. La condizione che deve essere soddisfatta affinché una taglia sia sufficiente a soddisfare un determinato fabbisogno, è che il valore minimo di potenza prodotto dalla pompa sia maggiore del valore massimo della firma energetica, quest'ultima è moltiplicata per un fattore di sicurezza, il quale tiene conto di tutte le approssimazioni ipotizzate nella stesura dell'algoritmo.

In *Figura 17* sono raffigurate la curva della firma energetica, in arancio, e della potenza istantanea di due diverse pompe di calore, in azzurro e verde. L'incrocio tra la curva verde e quella arancio dovrebbe essere il caso solitamente adottato nei sistemi reali mentre quello tra la curva azzurra e quella arancio è la situazione che si è adottata nello sviluppo di tale applicativo. In ordinata viene espressa la potenza in [kW] mentre in ascissa la temperatura esterna [°C].

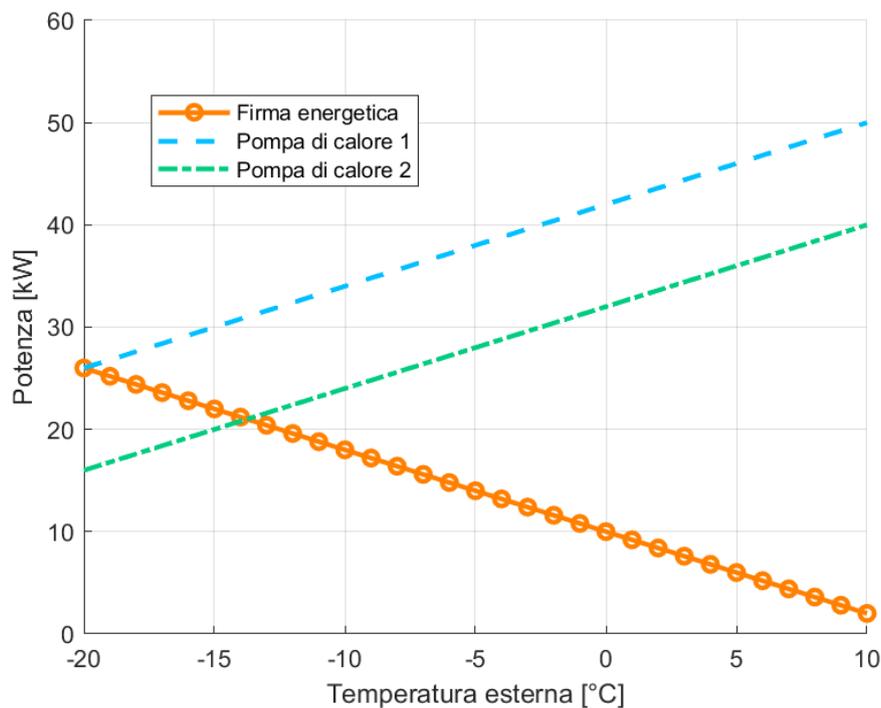


Figura 17 Confronto tra la curva della firma energetica e due curve di produzione di potenza termica di due diverse pompe di calore

4.3 - Parametri di output forniti dall'applicativo

Dall'analisi del confronto tra la caldaia a punto fisso e la pompa di calore selezionata per soddisfare il fabbisogno termico vengono ottenuti anche i seguenti output:

- CO₂ prodotta dalla pompa di calore selezionata

Per il calcolo della produzione di CO₂ di una pompa di calore bisogna calcolare inizialmente il COP, ovvero il coefficiente di prestazione che rappresenta il rapporto tra l'energia termica generata e l'energia elettrica assorbita, a partire dai coefficienti presenti nel database delle pompe [34]. Successivamente si calcola l'energia elettrica totale necessaria al funzionamento per soddisfare il fabbisogno termico. Prima però:

$$firma\ energetica\ positiva = \max(firma\ energetica, 0) \quad (25)$$

Nel vettore della firma energetica compaiono sia termini positivi che negativi, a questi ultimi corrispondono quelle giornate dell'anno che non fanno parte del periodo di riscaldamento. Il passaggio di creare un altro vettore con solo valori positivi o tutt'al più pari a zero si esegue perché nel calcolo del fabbisogno termico totale si vuole tenere conto soltanto dei giorni in cui l'impianto di riscaldamento è effettivamente in funzione.

$$Potenza\ elettrica_{Pdc} = \frac{firma\ energetica\ positiva}{COP_{Pdc}} [kW] \quad (26)$$

$$Energia\ elettrica_{Pdc} = \int_{ore}^{ore} Potenza\ elettrica_{Pdc} dh [kWh] \quad (27)$$

Ed infine

$$Pdc_{CO_2} = Energia\ elettrica_{Pdc} * k [kg_{CO_2}] \quad (28)$$

Dove k è un dato IPCC 2008 e riguarda le emissioni per la produzione di energia elettrica ed è pari a $0,280 \left[\frac{kg_{CO_2}}{kWh} \right]$;

- CO₂ prodotta dalla vecchia caldaia a punto fisso

$$Fabbisogno\ termico\ totale = \int_{ore} \dot{q} \text{ firma energetica positiva } dh \text{ [kWh]} \quad (29)$$

$$Caldaia_{CO_2} = Fabbisogno\ termico\ totale * k \text{ [kg}_{CO_2}] \quad (30)$$

Dove k è un dato IPPC 2008 e riguarda le emissioni da gas naturale per le caldaie ed è pari a 0,202 $[\frac{kg_{CO_2}}{kWh}]$;

- Risparmio di CO₂ con il passaggio da una caldaia a punto fisso ad una pompa di calore

$$\Delta_{CO_2} = Pdc_{CO_2} - Caldaia_{CO_2} \text{ [kg}_{CO_2}] \quad (31)$$

- Picco elettrico

Per il calcolo del picco elettrico viene considerato il valore massimo della potenza elettrica prodotta dalla pompa per soddisfare il fabbisogno termico dell'edificio, in particolare il massimo corrisponderà al giorno più freddo dell'anno:

$$Picco\ elettrico_{Pdc} = \max(Potenza\ elettrica_{Pdc}) \text{ [kW]} \quad (32)$$

- Costo dell'energia elettrica per il funzionamento della pompa di calore

$$Costo\ elettrico_{Pdc} = Energia\ elettrica_{Pdc} * Costo\ energia\ elettrica \text{ [€]} \quad (33)$$

Dove il costo dell'energia elettrica è pari a 0,12 $\frac{€}{kW}$ ed è il prezzo dell'energia elettrica della rete;

- Risparmio conseguente all'installazione di una pompa di calore in sostituzione alla vecchia caldaia a punto fisso

$$Costo\ caldaia = \frac{Fabbisogno\ termico\ totale}{Potere\ calorifico * \eta_{tot} * k} [\text{€}] \quad (34)$$

Dove per costo della caldaia sono intesi i costi operativi, η_{tot} è il rendimento dell'impianto idraulico precedentemente calcolato, k è un parametro che rappresenta il costo del metano ed è pari a $0,4 \left[\frac{Smc}{\text{€}}\right]$ e infine il potere calorifero è quello del metano ed è pari a $10,94 \left[\frac{kWh}{Smc}\right]$. A questo punto si hanno tutti i dati per valutare il risparmio portato dall'installazione di una nuova pompa di calore:

$$Risparmio = Costo\ caldaia - Costo\ elettrico_{PdC} [\text{€}] \quad (35)$$

- Numero di pannelli fotovoltaici
Per eliminare il costo dell'energia elettrica dovuto al funzionamento della pompa di calore, viene calcolato il numero di pannelli fotovoltaici che consente di soddisfare il fabbisogno elettrico. La procedura per il calcolo viene spiegata nel prossimo capitolo;

4.4 - Calcolo numero dei pannelli fotovoltaici

Prima di analizzare la procedura di calcolo per il calcolo del numero di pannelli fotovoltaici in grado di soddisfare il fabbisogno elettrico della pompa di calore, è necessario fornire una panoramica sulla tecnologia in questione. Questa utilizza l'energia solare per la produzione di energia elettrica ed è perciò catalogata come una fonte di energia rinnovabile.

Il principio alla base del funzionamento è l'effetto fotovoltaico, un fenomeno naturale che si verifica quando la radiazione solare interagisce con un materiale semiconduttore, nel caso dei pannelli questo è solitamente il silicio cristallino [35]. Quest'ultimo è un elemento presente in natura in quantità elevate, secondo soltanto all'ossigeno, è un ottimo semiconduttore, e in base alla struttura cristallina si distingue in monocristallino o policristallino.

Il silicio, per potenziare l'effetto fotovoltaico, viene trattato aggiungendo delle impurità nel reticolo cristallino in un processo chiamato drogaggio [36]. A valle di questo, si possono ottenere due diverse classi di semiconduttore:

- Silicio di tipo p: nella struttura cristallina si aggiungono impurità pentavalenti, cioè elementi con cinque elettroni di valenza, come il fosforo o l'arsenico. Questi si legano al reticolo cristallino del silicio, ma poiché hanno un elettrone di valenza in più, l'elettrone resta libero e può muoversi all'interno del materiale;
- Silicio di tipo n: nel reticolo si introducono impurità trivalenti, cioè elementi con tre elettroni di valenza, come il boro o l'alluminio. Questi, avendo solo tre elettroni, formano legami con gli atomi di silicio ma lasciano una lacuna, una posizione vuota che si comporta come una carica positiva, nel reticolo cristallino.

In una cella fotovoltaica, queste due tipologie di semiconduttore vengono unite [37]. La giunzione tra queste due fasi, chiamata giunzione p-n, è cruciale per generare la corrente elettrica. Infatti, sia gli elettroni liberi che le lacune, a causa della differente distribuzione di carica tra il silicio p e quello n, tendono a muoversi in maniera tale da ricreare un equilibrio di carica all'interno del materiale. Nella regione della giunzione, si formano due zone, una con carica negativa, nella regione di tipo p, ed una con carica positiva, in quella di tipo n, con conseguente formazione di un campo elettrico.

Se si collega un terminale metallico, dove prende il nome di anodo, alla regione di tipo p ed uno, detto catodo, alla regione di tipo n si ottiene un dispositivo a due terminali che può essere collegato ad un circuito esterno ed essere attraversato da una corrente. A questo punto se un fotone, particella priva di massa e carica, portatrice dell'energia solare, colpisce la superficie del pannello e l'energia che porta con sé supera il valore di soglia, rompe i legami atomici e genera una coppia elettrone-lacuna. In questo modo i nuovi elettroni liberatisi si spostano dalla zona n alla zona p, creando un flusso di corrente elettrica che viene raccolto dagli elettrodi metallici. Questa corrente continua viene poi trasformata in corrente alternata da un inverter, per essere utilizzata dalla pompa di calore o immessa nella rete.

Ora che si è analizzato il funzionamento del pannello fotovoltaico, si procede con il calcolo del numero di pannelli da utilizzare per soddisfare il fabbisogno elettrico di una determinata pompa di calore in una specifica località. Per raggiungere tale obiettivo si fa riferimento alla normativa UNI 10349-1. Tale direttiva, come nel caso della costruzione dell'anno climatico

per la temperatura, dispone prima di tutto la creazione di un anno di riferimento per i valori di irradianza a partire da valori decennali di tale parametro. Quindi nello stesso modo in cui è stato creato l'anno tipo per le temperature nel capitolo 3.3, si ripete la stessa procedura pure per il profilo di irradianza. I dati necessari vengono ancora una volta recuperati dal database di OpenMeteo. I valori forniti hanno come unità di misura $\frac{kW}{m^2}$ ed è necessario al calcolo trasformare la misura in $\frac{kWh}{m^2}$ svolgendo un integrale lungo l'anno.

Passaggio precedente al calcolo del numero di pannelli, è la stima della quantità di energia prodotta da un singolo pannello in un anno. Si utilizza la seguente equazione:

$$E_{pannello} = Irradianza * A_{pannello} * \eta_{pannello} * PR \quad (36)$$

Dove i parametri sono i seguenti:

- Irradianza Solare Media Annuale $[\frac{kWh}{m^2 * anno}]$: è un valore caratteristico di ogni località e viene ottenuto dai database di OpenMeteo;
- Superficie del Pannello $A_{pannello} [m^2]$;
- Efficienza del Pannello $\eta_{pannello}$;
- Performance Ratio PR : ovvero l'efficienza totale del sistema compresi quindi l'alternatore, l'inverter, ecc.

Per quanto riguarda gli ultimi tre punti, i valori utilizzati sono dei dati medi delle tecnologie presenti sul mercato. Per quanto riguarda la superficie del pannello viene preso $1,6 m^2$, per l'efficienza del singolo pannello $0,22$ mentre per la performance ratio $0,75$ [38]. Infine si procede al calcolo del numero di pannelli necessario, infatti conoscendo l'energia prodotta da un singolo pannello ed il fabbisogno elettrico richiesto dalla pompa si può ottenere con la seguente equazione il risultato richiesto:

$$N_{pannelli} = \frac{Fabbisogno_{elettrico}}{E_{pannello}} \quad (37)$$

5 – ANALISI PARAMETRICA

5.1 - Prima fase di simulazione

Nei Capitoli precedenti è stato spiegato il funzionamento dell'algoritmo alla base dell'applicativo. A causa delle numerose assunzioni fatte durante la stesura, è necessario valutare la sensibilità del codice. Nei prossimi capitoli verranno analizzate le decisioni prese per eseguire al meglio le simulazioni, con l'obiettivo di verificare la correttezza degli output generati. L'obiettivo è determinare se i risultati ottenuti per una specifica località siano realistici al variare dei dati di input.

L'obiettivo di questa fase è quello di calibrare e di verificare la sensibilità dello script al variare dei dati in ingresso. Se i risultati per il comune di Udine, in zona E, e di Catania, in zona B, dovessero risultare analoghi significherebbe un errore di dimensionamento della pompa di calore. Se si analizzano i nove diversi tipi di input descritti al capitolo 4.1 si può identificare una netta distinzione tra loro. Quelli relativi all'ubicazione geografica dell'immobile e i dati di consumo sono fortemente legati alla temperatura, banalmente la temperatura varia in base alla posizione geografica e i consumi sono diretta conseguenza della rigidità del clima. Tutti gli altri parametri sono legati alle caratteristiche dell'edificio, in particolare l'impianto idraulico e la caldaia. Poiché le caratteristiche delle abitazioni possono essere simili, se non identiche, a livello nazionale, si è deciso di mantenere costanti i parametri relativi all'immobile nelle simulazioni, variando unicamente quelli legati al clima. In questo modo meglio si riescono ad analizzare gli effetti dell'ambiente esterno sulle prestazioni delle tecnologie di riscaldamento.

Conseguenza di tale assunzione, è stato simulare per ogni località campione lo stesso numero di abitazioni. Nel test ogni abitazione possiede delle caratteristiche tecniche differenti e questo incide sul valore del rendimento energetico η_{tot} . Per avere campioni a sufficienza per ogni località si è deciso di eseguire la simulazione su dodici diversi edifici campione. Questo numero è stato scelto per non appesantire eccessivamente il calcolo numerico dovuto sostenere dal computer in fase di test. In questo modo gli unici dati a variare sono i valori delle bollette e della temperatura esterna.

Le dodici diverse tipologie di abitazioni utilizzate nella simulazione sono ottenute combinando tra loro i seguenti parametri:

- Efficienza della caldaia **, ***, ****;
- Termostato singolo o un termostato per stanza;
- Impianto idraulico realizzato prima del 1990;
- Impianto idraulico ad utente singolo (villetta) o centralizzato a un piano (appartamento in condominio a singolo piano).

Per semplicità, in fase di analisi, ad ognuna delle dodici abitazioni è stata assegnata una lettera identificativa. Di seguito verranno elencati i diversi immobili di prova e le corrispettive caratteristiche:

- **A**
 1. Efficienza caldaia: **
 2. Termostato singolo
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico ad utente singolo
- **B**
 1. Efficienza caldaia: **
 2. Termostato singolo
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico centralizzato a un piano
- **C**
 1. Efficienza caldaia: **
 2. Un termostato per stanza
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico ad utente singolo
- **D**
 1. Efficienza caldaia: **
 2. Un termostato per stanza
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico centralizzato a un piano

- **E**
 1. Efficienza caldaia: ***
 2. Termostato singolo
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico ad utente singolo
- **F**
 1. Efficienza caldaia: ***
 2. Termostato singolo
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico centralizzato a un piano
- **G**
 1. Efficienza caldaia: ***
 2. Un termostato per stanza
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico ad utente singolo
- **H**
 1. Efficienza caldaia: ***
 2. Un termostato per stanza
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico centralizzato a un piano
- **I**
 1. Efficienza caldaia: ****
 2. Termostato singolo
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico ad utente singolo
- **J**
 1. Efficienza caldaia: ****
 2. Termostato singolo
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico centralizzato a un piano

- **K**
 1. Efficienza caldaia: ****
 2. Un termostato per stanza
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico ad utente singolo
- **L**
 1. Efficienza caldaia: ****
 2. Un termostato per stanza
 3. Impianto idraulico realizzato prima del 1990
 4. Impianto idraulico centralizzato a un piano

A questi parametri, che variano di abitazione in abitazione, se ne devono aggiungere altri due che rimangono fissi per ogni immobile, ovvero potenza nominale della caldaia a punto fisso, pari a 32kW, e primo orario di riscaldamento che va dalle 06:00 alle 11:00 e secondo dalle 17:00 alle 24:00. Nella simulazione, i dati di input a variare saranno quelli relativi all'ubicazione dei comuni campione e quelli dei consumi di gas naturale, che saranno forniti da delle bollette medie che sono associate alle diverse località in base al valore dei gradi giorno.

Si sottolinea, infine, il seguente aspetto. In questa fase dello sviluppo dell'algoritmo, non vengono richiesti dati di input. Per quanto concerne i parametri relativi alle abitazioni, le dodici diverse tipologie di edificio sono state create appositamente mentre i dati relativi alle località da analizzare e alle bollette vengono recuperati da due diversi database. Per quanto riguarda i consumi viene prima creata in Excel e poi importata su Matlab una tabella con tutti i valori di bolletta di interesse. Le bollette utilizzate in questo database sono recuperate dai database di ARERA e, come verrà analizzato in seguito, fanno riferimento a dei consumi medi per ogni zona climatica. Inoltre, per le località sotto studio, viene creato, sempre su Excel, un elenco, poi importato su Matlab, con il relativo nome e CAP. Così, una volta predisposti i comuni campione, il codice importa i dati geografici e da quelli è poi in grado di risalire all'anno tipo climatico e alle bollette. In questo modo, tutti i dati di input per la simulazione vengono inseriti automaticamente senza dover inserire tutte le specifiche necessarie volta per volta.

Per comprendere le scelte finali per la simulazione bisogna prima di tutto analizzare i tentativi antecedenti. Nei prossimi Capitoli verranno analizzati i vari passaggi che hanno portato alla soluzione conclusiva precedentemente discussa.

5.1.1 - Comuni campione nelle fasi iniziali di simulazione

L'obiettivo finale è rendere l'applicativo accessibile a tutti gli utenti presenti su una qualsiasi zona del territorio italiano. Pertanto, non è sufficiente valutare l'accuratezza dell'algoritmo su un numero limitato di comuni situati nella stessa area geografica o caratterizzati da climi peculiari. È necessario selezionare un campione di località rappresentative delle diverse zone geografiche e climatiche, distribuite in modo tale da coprire l'intera Penisola. Nelle prime fasi di simulazione, non avendo ancora delineato il procedimento migliore da seguire, vengono selezionati solo alcuni comuni campione. A tal fine vengono simulate, in questa fase, soltanto sei circoscrizioni territoriali. Queste saranno rappresentative di diverse zone del territorio e apparterranno a diverse fasce climatiche. In questa fase, inoltre, si è deciso di omettere la simulazione per i comuni appartenenti alla zona A, in quanto scarsamente presenti sul territorio, ad essa appartengono solamente i comuni di Linosa, Lampedusa e Porto Empedocle, e quelli in zona F, in quanto anche in questo caso le località che la rappresentano sono relativamente poche e le temperature particolarmente rigide. I valori indicati nelle bollette di questi comuni riflettono situazioni estreme, mentre l'attenzione è attualmente focalizzata su condizioni metereologiche più comuni.

Per tale motivo, i comuni considerati apparterranno tutti alle fasce B, C, D ed E. In particolare all'interno di quest'ultima fascia vengono prese in considerazione diverse località, sono stati infatti testati sia il comune di Padova che quello di Bolzano che quello di Trieste. Questa decisione è dovuta al fatto che, nonostante l'appartenenza alla stessa fascia, il primo abbia una condizione climatica maggiormente umida, a causa della posizione geografica al centro della Pianura Padana, il secondo maggiormente secca, grazie a delle temperature medie più basse che riducono la quantità di vapore acqueo presente in atmosfera, ed infine il terzo, che grazie alla posizione sul mare, risulta anch'esso, come il comune altoatesino, maggiormente secco rispetto al comune veneto. Inoltre, per verificare che l'algoritmo sia affidabile

anche per le restanti zone della Penisola, è necessario prendere come campione anche delle altre località che coprono il territorio mancante. Per le restanti fasce vengono presi, il comune di Roma per la zona D, quello di Lecce per la C e infine quello di Palermo per la zona B. In questo modo viene scelta una zona rappresentativa sia per il Centro che per il Sud che per le isole. Il Nord Italia è di fatto la zona maggiormente rappresentata poiché gli inverni sono più rigidi e garantire il fabbisogno termico risulta più fondamentale che altrove.

5.1.2 - Criticità nell'utilizzo delle bollette medie per la simulazione dei consumi energetici

L'algoritmo è pensato e basato su degli input che l'utente inserisce in base alle caratteristiche e consumi della propria abitazione. In questa fase di analisi non è possibile in alcun modo recuperare delle bollette che corrispondano ad un caso reale per le varie località italiane. Bisogna quindi fare riferimento a ciò che si trova disponibile in letteratura. Il sito di ARERA, Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, offre due tipologie di bollette, un tipo che fornisce il consumo medio degli immobili in una specifica provincia italiana e l'altro che mette a disposizione i dati medi di consumo degli edifici appartenenti ad una stessa zona climatica. Per capire quale delle due sia più conveniente utilizzare nell'analisi vengono testate entrambe. Nei primi test eseguiti, per ridurre il tempo di calcolo computazionale, vengono effettuate le prove di sensibilità solamente su due edifici e, una volta individuata la strategia migliore per procedere con l'analisi, tale numero è destinato ad aumentare.

Il problema dei dati a disposizione è che sono dei valori medi ottenuti dalla media dei consumi di tutti gli edifici presenti rispettivamente in una specifica provincia o in una zona climatica. Di conseguenza non si è in possesso di dati reali per testare la sensibilità dell'algoritmo e prendere il valore medio dei consumi risulterebbe troppo generico.

Le problematiche che affliggono le bollette di provincia riguardano la possibile presenza di diverse zone climatiche all'interno della singola circoscrizione territoriale. Se per esempio l'80% degli immobili di una provincia si trova in zona climatica D e il restante 20% in E, le bollette di questi ultimi, nel calcolo della media, avranno poco peso e quindi

durante la simulazione i comuni presenti in questa fascia avranno associati dei valori di consumo molto più vicini ai valori di una diversa fascia climatica.

Per quanto riguarda le bollette derivanti dalla media dei consumi delle abitazioni all'interno della stessa zona climatica, le problematiche derivano maggiormente dal vasto numero di dati utilizzati nel calcolo della media. In questo modo, tutte le peculiarità e tutti i microclimi della Penisola vengono "cancellati".

Ad esempio si considerino due località con lo stesso numero di gradi giorno ma differente distribuzione delle temperature nel corso dell'anno. A causa della posizione geografica, il clima della prima località risulta essere particolarmente rigido soltanto nei mesi di dicembre e gennaio mentre quello della seconda emerge essere mediamente più freddo di quest'ultimo nei mesi di ottobre, novembre e febbraio ma più mite in quelli di dicembre e gennaio. Si supponga, inoltre, che la seconda località sia maggiormente popolata. I consumi di quest'ultima risulteranno diversamente distribuiti rispetto alla prima, la quale avrà quantità di metano consumato maggiore soltanto nell'ultimo e nel primo mese dell'anno. Nella bolletta media della fascia climatica, i consumi dei comuni appartenenti alla seconda zona, maggiormente popolata, avranno un peso e una rilevanza maggiore rispetto alle località della prima. La conseguenza finale sarà che durante la simulazione, quei microclimi poco rappresentati, avranno come riferimento delle bollette di consumo molto distanti dai loro valori reali.

Inoltre per il sistema dei gradi giorno, col quale ogni comune italiano viene attribuito ad una specifica zona climatica, i comuni che posseggono un valore di GG più rappresentativo rispetto agli altri avranno un maggior peso nel calcolo della bolletta media. Si prenda come esempio la fascia climatica E. Per appartenere a tale fascia, il valore dei gradi giorno deve essere tra 2101 e 3000. Se alla maggioranza dei comuni di questa fascia si può attribuire un valore di GG pari a 2330, la bolletta finale sarà particolarmente influenzata dai consumi di queste località. Per i comuni con un GG lontano da questo valore, la bolletta di riferimento risulta essere sopra o sotto stimata.

C'è un ulteriore problema che affligge entrambe le tipologie di bollette, ovvero la distribuzione degli edifici nelle differenti classi energetiche. Queste sono un indice delle dispersioni termiche prodotte da un immobile. In generale le abitazioni di ultima

generazione, grazie alle migliori tecnologie e regolamentazioni, apparterranno a classi energetiche migliori mentre quelli più datate a fasce più basse. Come negli esempi precedenti, se la maggior parte degli edifici di una determinata zona climatica o provincia appartiene a una specifica classe energetica, questa avrà un peso maggiore nel calcolo della media finale, mentre le altre saranno meno rappresentate. In altre parole, la distribuzione delle classi energetiche all'interno di una zona influenzerà significativamente la media, facendo sì che le classi più comuni incidano maggiormente rispetto a quelle meno presenti.

Risulta quindi necessario svolgere delle manipolazioni su tali bollette in maniera tale da renderle adatte a qualsiasi abitazione in una qualunque zona della Penisola. Ciò comporta scalare le bollette recuperate dal sito di ARERA prendendo come riferimento le problematiche appena elencate.

5.1.3 - Correzione delle bollette medie di una zona climatica

Seppur le criticità legate delle classi energetiche colpiscano entrambe le tipologie di bollette, la categoria maggiormente affetta da tale problematica risulta essere quella coi valori riferiti ad un'intera zona climatica. Il motivo è presto detto, una quantità molto maggiore di edifici considerati all'interno della media. In tale capitolo verrà quindi esplorata la soluzione proposta per questa tipologia di bollette.

Appartenere a diverse classi energetiche implica differenti dispersioni termiche dell'abitazione e di conseguenza, relativamente all'algoritmo prodotto, diverse efficienze termiche η_{tot} . Pertanto, due stabili appartenenti allo stesso comune, saranno soggetti a consumi molto diversi tra loro anche se esposti alle stesse condizioni climatiche.

La prima soluzione proposta è scalare le bollette dando diverso peso alle varie classi energetiche. Ciò significa che, rispetto alla bolletta media, una classe energetica bassa avrà un valore di consumo maggiore mentre una classe alta avrà dei consumi molto più bassi. Per operare in tale direzione, bisogna, anzitutto, indagare la distribuzione di appartenenza degli immobili alle molteplici classi.

Nel database SIAPE di ENEA, gli attestati di prestazione energetica al 31/01/2022 sono 2915669 [39]. La suddivisione per immobili residenziali in Italia risulta la seguente:

- Classe energetica G 35,2%;
- Classe energetica F 24,5%;
- Classe energetica E 16,3%;
- Classe energetica D 9,9%;
- Classe energetica C 4,3%;
- Classe energetica B 2,4%;
- Classe energetica A1 2,0%;
- Classe energetica A2 1,8%;
- Classe energetica A3 1,7%;
- Classe energetica A4 2,0%.

Come si può estrapolare dall'elenco, la maggior parte degli edifici in Italia appartiene alle classi energetiche F e G, che da sole comprendono oltre il 50% degli immobili presenti sul territorio. Conseguenza di tale evidenza, induce a pensare che le abitazioni che contribuiscono maggiormente ai valori finali presenti nelle bollette medie siano quelle appartenenti a tali classi. L'idea che ne deriva è che se i consumi sono riferiti a dei valori medi allora sono anche riferiti a degli edifici medi, ovvero alla classe maggiormente presente sul suolo italiano. In particolare, considerando le percentuali, e di conseguenza il peso delle varie classi, quella più logica alla quale fare riferimento è la F. Il ragionamento che porta a considerare quest'ultima come la più sensata si basa principalmente su una distribuzione equilibrata delle classi energetiche degli edifici. Se il 50% degli edifici appartiene a classi più efficienti, quindi superiori, e solo il 30% rientra in quelle meno performanti, la classe F si pone esattamente in una posizione intermedia.

A questo punto, i valori di consumo mensili presenti nelle bollette medie delle zone climatiche vengono associate esclusivamente al consumo degli edifici appartenenti alla classe energetica F. Per ottenere i valori pure per le restanti fasce, bisogna analizzare quali sono i parametri che determinano la suddivisione in base alla prestazione energetica. L'indicatore che permette tale divisione è l'Epg, ovvero indice di prestazione energetica, e i diversi intervalli di ogni classe energetica vengono riportati in *Tabella 8*.

Un immobile risulta appartenere alla classe energetica F se il valore di Epg è compreso in un range tra 2,61 e 3,50. Si parla, invece, di un edificio di classe E se risulta un valore incluso tra 2,01 e 2,60. A partire dai valori di consumo della classe F e dai due range di Epg, per trovare i dati della bolletta di un edificio di classe E si è adottata la seguente proporzione. Supponendo un consumo di 200Smc per il mese di gennaio per edifici di classe F si imposta la seguente:

$$200 : 3,055 = x : 2,305 \quad (38)$$

Dove 3,055 e 2,305 sono i valori medi dell'Epg della rispettiva classe energetica. Svolgendo il calcolo, risulta che il consumo in fascia energetica E per il mese di gennaio equivale a 150,9Smc. Tale operazione viene svolta per ogni mese in modo tale da ricreare tutte le bollette dell'anno. Inoltre, tale procedimento viene svolto per tutte le classi energetiche di consumo.

Classe	Consumo
A	<1 Epg
B	1,01 - 1,20 Epg
C	1,21 - 1,50 Epg
D	1,51 - 2,00 Epg
E	2,01 - 2,60 Epg
F	2,61 - 3,50 Epg
G	> 3,51 Epg

Tabella 8

In *Tabella 9* viene riportato un esempio di consumi scalati per gli edifici appartenenti alla zona climatica E. Nella prima riga sono raffigurati i mesi a cui sono riferiti i valori in bolletta. Nella seconda sono presenti i dati di gas naturale consumato secondo le stime della bolletta media. Nelle restanti righe sono invece presenti i valori di consumo scalati

in base alla classe energetica di appartenenza, indicata nella prima colonna. Vengono riportati soltanto i risultati di alcune classi energetiche. Si noti inoltre come al diminuire della classe energetica, quindi verso prestazioni sempre più efficienti, i consumi diminuiscano rispetto alla bolletta di riferimento.

	Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22
Tot	50	100	163	183	135	124	59	16	15	14	14	15
C	22	44	72	81	60	55	26	7	7	6	6	7
E	37	75	123	138	102	94	45	12	11	10	10	12
F	50	100	163	183	135	124	59	16	15	14	14	15

Tabella 9

Per velocizzare e semplificare questa prima fase di test, si è deciso di ridurre al minimo il numero di parametri variabili. Gli unici dati che non possono essere mantenuti costanti riguardano tutti i fattori legati alla località sotto studio, le quali sono state scelte in precedenza al capitolo 5.1.1, di conseguenza, essendo i valori di consumo connessi alla zona climatica, essi varieranno in base all'ubicazione. Essendo quindi disponibili per ogni zona climatica sette diverse bollette, pari al numero di fasce energetiche degli edifici, si è preferito testare l'algoritmo solo sulle bollette della classe C e della F. La classe F è la più rappresentativa, mentre la C è stata selezionata poiché si colloca in una posizione intermedia in termini di consumi. Per lo stesso motivo, data la vasta gamma di edifici con diversi η_{tot} che possono essere inseriti nell'algoritmo, si è optato per la creazione di abitazioni modello strettamente correlate alla classe energetica di riferimento. Si abbina infatti agli edifici appartenenti alla fascia F un immobile a bassa prestazione energetica, denominato A, mentre alla C un edificio a media, chiamato B. La decisione di ridurre il numero di variabili di input è motivata anche dal fatto che, limitando i fattori in gioco, si può valutare più efficacemente la flessibilità dei risultati rispetto ai pochi valori che cambiano.

In Tabella 9, quindi, le righe corrispondenti agli edifici di classe C ed F mettono in evidenza le bollette selezionate per la simulazione e rispettivamente sono i consumi abbinati alla tipologia di casa B ed A. Le caratteristiche di quest'ultima sono le seguenti, si tratta di un edificio ad utente singolo con un impianto idraulico risalente a prima del 1990, con caldaia a tre stelle di efficienza e termovalvole. L'immobile B rimane sempre un'abitazione ad utente singolo con un

impianto idraulico costruito dopo il 2010, con caldaia a quattro stelle di efficienza e termostato singolo. Il calcolo di η_{tot} viene eseguito a partire da questi valori fissati.

5.1.4 - Correzione delle bollette medie di una provincia

Le bollette medie di provincia sono sì influenzate dalla distribuzione degli edifici in diverse classi energetiche, ma la problematica maggiore rimane la possibile appartenenza delle diverse località del territorio a diverse zone climatiche. Tale aspetto è gestito con il calcolo dei gradi giorno di un comune che sono indicatori del valore delle temperature esterne e di conseguenza dei consumi di gas naturale. A differenza delle bollette riferite alle zone climatiche, in questo caso si preferisce porre l'attenzione su quest'altro aspetto. Di conseguenza a cambiare sarà anche la strategia con la quale verranno scalate le bollette, ora infatti si adopereranno i valori dei gradi giorno.

In maniera analoga al caso precedente, in cui veniva ipotizzato che i valori di consumo presenti nella bolletta recuperata dai database di ARERA si riferissero ad una classe energetica "media", anche in questo caso la quantità mensile di gas naturale utilizzata fa riferimento ad una località fittizia con la seguente peculiarità, i gradi giorno ad essa associati, sono pari al valore medio dei GG dei comuni di tutta la provincia. Per ottenere tale valore si deve utilizzare il database climatico creato precedentemente. Per ogni località viene registrato il profilo delle temperature medie annuali, dal quale si possono determinare i gradi giorno. Raggruppando i vari comuni per provincia, avendo a disposizione il valore di gradi giorno per ogni località, è possibile calcolare la media dei valori relativi a ciascuna area.

In *Tabella 10* sono riportati i consumi per la provincia di Bolzano, una di quelle campione, il cui valore di gradi giorno risulta pari a 4328. Tale valore equivale alla media dei valori di gradi giorno di tutta la provincia, ottenuto eseguendo la media dei valori di tutti i comuni appartenenti a quest'area.

Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22
82	115	164	173	135	120	66	22	17	15	15	19

Tabella 10

A questo punto, analogamente a quanto svolto nel capitolo 5.1.3, è necessario determinare il consumo di gas naturale per il singolo comune, in particolare in questa fase per il capoluogo di provincia. Di seguito, verrà illustrato l'esempio relativo a Bolzano, ma il procedimento è applicabile anche alle altre località. Per calcolare il consumo mensile di gas naturale, si parte dal valore medio riportato nelle bollette, questo valore deve essere moltiplicato per i gradi giorno del comune in questione e successivamente diviso per i gradi giorno medi della provincia. L'equazione seguente mostra il calcolo numerico appena descritto:

$$Consumo_{\text{ottobre Bolzano}} = Consumo_{\text{ottobre provincia}} * \frac{GG_{\text{Bolzano}}}{GG_{\text{provincia}}} = 82 * \frac{2821}{4328} = 53 \text{ Sm}^3 \quad (39)$$

In *Tabella 11*, a scopo illustrativo vengono riportati i valori di consumo per alcuni comuni all'interno della provincia di Bolzano. Con questa Tabella si intende evidenziare la diversità dei valori che si possono ottenere al variare dei gradi giorni rispettivamente per Bolzano pari a 2821, per Merano a 3290, per Brunico a 4410 e per Verano a 5235. Si noti come il valore di gradi giorno del capoluogo di provincia rispetto al valore della media sia molto più basso e di conseguenza questa si traduce in minori consumi rispetto alla bolletta di ARERA. Da notare anche come un valore di GG superiore a quello medio equivalga a maggiori consumi rispetto alla bolletta di riferimento.

	Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22
Bolzano	53	75	107	113	88	78	43	15	11	10	9	13
Merano	62	87	125	131	103	91	50	17	13	11	11	15
Brunico	83	117	167	176	138	122	67	23	17	15	15	20
Verano	99	139	198	209	163	145	79	27	20	18	18	23

Tabella 11

Decisa la procedura da utilizzare per scalare tale tipologia di bollette, per automatizzare il processo bisogna, anche in questo caso, fissare i parametri legati al calcolo di η_{tot} . Si opta di utilizzare le stesse specifiche delle abitazioni A e B, descritte nel capitolo 5.1.3. In questo modo, nella fase successiva in cui vengono confrontati i risultati ottenuti

scalando le due diverse tipologie di bollette, risulta più immediato e semplice analizzare come variano gli output al variare solo delle bollette di consumo, avendo “standardizzato” i restanti valori di input.

5.1.5 - Risultati della prima fase di simulazione

In *Tabella 12* vengono riportati i risultati ottenuti dai due diversi metodi. La tabella viene divisa in tre parti e in ognuna vengono riportati dei parametri significativi per il confronto. Nella parte rossa sono presenti i nomi dei capoluoghi di provincia campione con la zona climatica di appartenenza, i relativi gradi giorno e la tipologia di casa che viene simulata. Nella parte gialla vengono trascritti alcuni risultati importanti della simulazione con le bollette delle zone climatiche mentre nella parte blu sono ripresi i risultati dell’analisi con le bollette medie di provincia. Per quanto riguarda gli output inseriti nella tabella, sono presenti i valori della taglia della pompa di calore fornita dall’algoritmo, la media giornaliera dei consumi invernali considerato tutto il periodo di riscaldamento, il fabbisogno termico (EN Th tot) e il fabbisogno elettrico totale (EN El tot).

Località				Bollette Zona Climatica	Bollette provincia
Nome	Tipo casa	Zona climatica	Gradi giorno	Taglia PdC	
Padova	A	E	2782	8	10
	B			6	10
Bolzano	A	E	2821	10	6
	B			6	6
Palermo	A	B	1243	6	6
	B			6	6
Roma	A	D	2023	6	6
	B			6	6
Lecce	A	C	1510	6	6
	B			6	6
Trieste	A	E	2477	6	6
	B			6	6

Tabella 12

Dopo un'accurata analisi, si osserva che i risultati sono più o meno analoghi e nessun modello proposto per scalare le bollette sembra essere più efficace dell'altro. In definitiva si possono utilizzare entrambi i metodi per scalare le due differenti tipologie di bollette. La decisione finale però è di portare avanti la simulazione scalando le bollette per il valore dei gradi giorno. Il motivo è il seguente, nei calcoli vengono considerati sia il consumo che le efficienze termiche degli edifici e si preferisce evitare di legare tra loro questi parametri, come viene proposto dal metodo descritto nel Capitolo 5.1.3. L'obiettivo è lasciare queste variabili indipendenti l'una dall'altra. Inoltre, la bolletta che si riferisce alla fascia climatica prende in considerazione una moltitudine molto maggiore di edifici rispetto a quella riferita alla provincia, per la quale si presume che i dati siano più specifici.

5.1.6 - Estensione dei comuni campione

Individuata la strategia da seguire per l'adeguamento delle bollette, la simulazione può procedere ampliando il numero di località sottoposte all'algoritmo. Nella prima fase si sono analizzate soltanto località del Nord-Est, in questa si sopperisce la mancanza di aree del Nord-Ovest analizzando i consumi per la provincia di Sondrio. Nello stesso modo vengono incrementati i comuni da analizzare in fascia C e in B. Di seguito vengono ricapitolate le province campione e la rispettiva fascia climatica:

- Zona E: Bolzano, Padova, Sondrio, Trieste;
- Zona D: Roma;
- Zona C: Brindisi, Lecce, Taranto;
- Zona B: Palermo, Siracusa.

In questa fase, non verranno analizzati semplicemente i risultati per i capoluoghi delle diverse province, bensì anche dei comuni rappresentativi all'interno di tali circoscrizioni territoriali. In particolare, siccome il metodo considerato per scalare le bollette fa riferimento al numero dei gradi giorno, le località campione presentano un valore GG in genere molto diverso rispetto a quello del capoluogo. Come anticipato nel capitolo 5.1.2, all'interno di una provincia possono figurare diverse zone climatiche, l'intento dei comuni scelti è quello di ricoprire quindi tutte queste fasce.

In *Tabella 11*, vengono riportati alcuni comuni scelti e le bollette scalate per la provincia di Bolzano, in *Tabella 13* quelli di Sondrio, in *Tabella 14* quelli di Roma e in *Tabella 15* quelli di Taranto.

	Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22
Sondrio	49	93	149	139	108	97	55	20	14	12	12	17
Livigno	102	193	311	289	225	201	114	43	30	25	25	35

Tabella 13

	Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22
Roma	16	37	66	82	62	65	31	12	11	10	10	11
Casape	21	49	90	111	85	88	42	16	14	13	13	15
Monte Compatri	22	51	93	114	87	90	44	16	15	14	14	15

Tabella 14

	Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22
Taranto	18	39	104	123	98	104	35	15	13	13	12	14
Laterza	24	51	137	161	129	137	45	20	18	17	16	18

Tabella 15

Dopo un'attenta analisi dei valori riportati, si pone particolare attenzione al comune di Laterza, in provincia di Taranto, a quello di Livigno in provincia di Sondrio e ai comuni di Brunico, Verano e Merano per la provincia di Bolzano. Caratteristica comune a tutte queste località è un valore di gradi giorno molto diverso dalla media della rispettiva provincia (per Laterza il valore di GG è pari a 1995 contro una media provinciale di 1600, mentre per Livigno il valore è pari a 6507 contro una media di 3800). Come si vedrà in seguito, tale criticità creerà problematiche nella fase di test della sensibilità dell'algoritmo.

5.2 - Seconda fase di simulazione

Procedendo con il metodo suggerito al capitolo 5.1.4 di scalare le bollette riferite ai consumi medi di una provincia con i gradi giorno, si analizzano le località proposte nel capitolo 5.1.6. Per analizzare più a fondo la sensibilità dell'algorithm, non solo si è scelto di aumentare il numero di comuni campione all'interno della stessa provincia ma anche di incrementare il numero di edifici modello da due a dodici. Le caratteristiche di tali immobili sono riassunte nel capitolo 5.1.

Nel capitolo 5.1.5 sono presentati i risultati della prima fase di simulazione. Le criticità di questi esiti risiedono nella somiglianza dei valori ottenuti con i due diversi metodi e soprattutto nella scarsa varietà di modelli delle pompe di calore proposte dall'algorithm per le differenti località. Inoltre, e ancor più grave, le taglie fornite non sono nemmeno verosimili. Bolzano, in fascia E, risulta avere la stessa taglia di Palermo, fascia B. I problemi non si limitano esclusivamente a tale parametro. Simulando altri comuni della provincia altoatesina, come il comune di Merano, emergono errori pure nel calcolo del picco elettrico. In *Tabella 16*, si nota come quest'ultimo parametro per il comune di Merano risulta di due ordini di grandezza superiore a quello dei comuni di Brunico e Verano. Vengono inoltre riportate le taglie delle pompe di calore suggerite dall'algorithm per ognuna delle dodici diverse tipologie di abitazione. Ad ogni colonna è infatti associata una differente classe di immobile precedentemente creato.

A	E	I	L	
Merano				
30	30	30	30	Taglia PdC
107	111	114	118	Picco elettrico
Brunico				
8	8	8	8	Taglia PdC
2	2	2	2	Picco elettrico
Verano				
12	12	12	12	Taglia PdC
4	4	4	4	Picco elettrico

Tabella 16

Facendo riferimento inoltre a *Tabella 11*, si nota che il valore dei gradi giorno di Merano, pari a 3290, è minore rispetto sia a quello di Brunico, uguale a 4410, sia a quello di Verano, che risulta 5235. Tale evidenza rende inverosimile non solo il valore molto maggiore del picco elettrico del primo comune, ma anche la taglia della pompa di calore fornita dall'algoritmo che risulta essere di 30kW, il valore massimo presente in database, per Merano contro gli 8kW e i 12kW rispettivamente per i comuni di Brunico e Verano. Intuitivamente, un comune che presenta un valore di gradi giorno più alto, e quindi temperature minori durante l'anno, presenta un fabbisogno termico maggiore e di conseguenza necessita di una potenza maggiore.

5.2.1 - Impatto della temperatura esterna sul dimensionamento

Per comprendere da cosa derivino le problematiche legate all'errato dimensionamento, è necessario analizzare la parte di codice responsabile della scelta della taglia della pompa di calore. Tale procedura viene svolta, come spiegato nel Capitolo 4.2, con un ciclo iterativo che confronta la minima potenza prodotta dalla pompa di calore e il massimo della firma energetica. Per come sono stati definiti, il primo valore dipende dai coefficienti presenti nel database delle pompe e dalla temperatura esterna mentre il secondo dipende anch'esso dalla temperatura esterna ma anche dalla potenza termica oraria richiesta dall'edificio. Mentre i coefficienti che derivano dal database sono dei valori forniti dai produttori delle pompe di calore, le temperature e la potenza termica, che si ottiene a partire dai consumi presenti in bolletta, costituiscono i dati soggetti a variazione. Va inoltre evidenziato che le tre località appartengono alla stessa provincia, pertanto la bolletta di riferimento è la medesima, nonostante venga poi scalata in base al differente valore dei gradi giorno. L'unico parametro, quindi, a variare significativamente tra i comuni è la temperatura esterna.

Ricreando l'andamento di temperatura dei tre comuni, si riscontra che quelli di Merano e di Verano presentano delle anomalie. Per anomalie si intendono valori estremi che si discostano notevolmente dagli altri massimi o minimi, in questo caso per l'indagine hanno rilevanza soltanto i secondi. In *Figura 18* si può osservare come varia il profilo di temperatura durante l'anno per il comune di Merano, in *Figura 19* viene riportato l'andamento per il comune di Verano e infine in *Figura 20* quello del comune di Brunico. In ordinata viene rappresentato il valore di temperatura [°C] mentre in ascissa il numero

cumulativo delle ore al passare dei giorni [ora]. I diversi valori che assume la temperatura al variare delle ore sono raffigurati nello schema da dei punti vuoti blu.

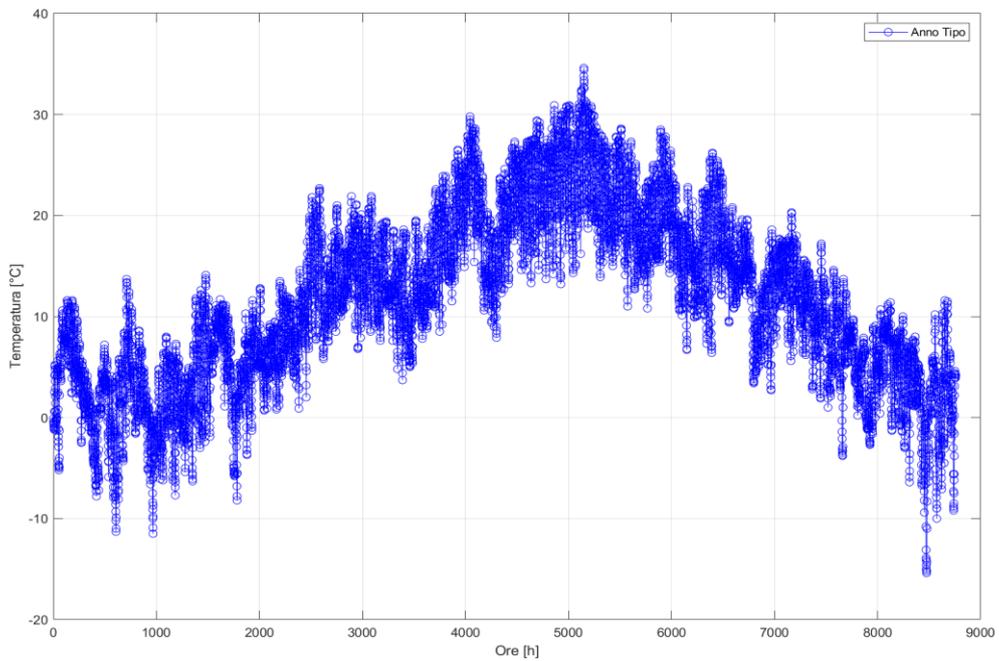


Figura 18 Andamento della temperatura dell'anno caratteristico per il comune di Merano

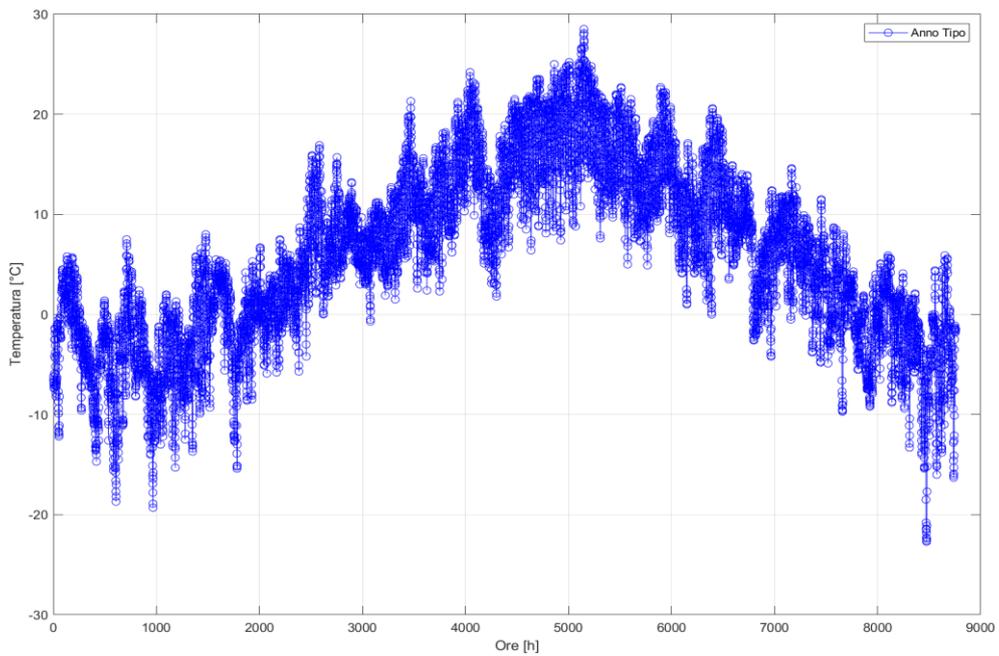


Figura 19 Andamento della temperatura dell'anno caratteristico per il comune di Verano

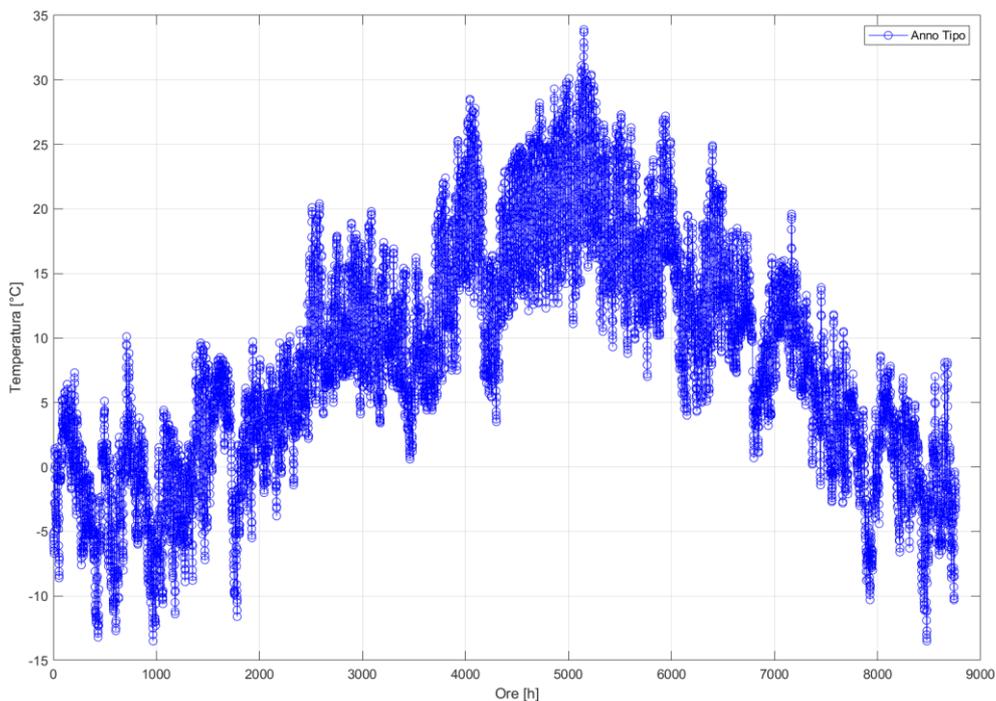


Figura 20 Andamento della temperatura dell'anno caratteristico per il comune di Brunico

Nel caso del comune di Merano, come si può osservare dal grafico, la temperatura minima risulta solitamente maggiore di -10°C ad eccezione di tre picchi che raggiungono valori inferiori. I primi due, appartenenti ai primi mesi dell'anno, raggiungono temperature fino ai -12°C mentre il terzo, il più critico, rilevato nel mese di dicembre, raggiunge temperature di -16°C . Per quanto riguarda il comune di Verano, la situazione di valori anomali è pressoché la stessa, cambiano i valori assoluti delle temperature in gioco. I due minimi situati nei primi mesi dell'anno raggiungono temperature di poco inferiori a -20°C mentre il terzo, nel mese di dicembre, supera questi valori e si attesta attorno ai -24°C . Per quanto riguarda invece Brunico, la distribuzione della temperatura risulta più uniforme e non ci sono valori estremamente minori degli altri.

In *Tabella 17* vengono riportati i dati della potenza termica minima prodotta dalla pompa di calore selezionata, il massimo valore della firma energetica per gli edifici di tipologia L e la taglia della pompa di calore consigliata. La scelta è ricaduta su tale classe di edificio perché la firma energetica massima raggiunge valori più elevati rispetto alle altre tipologie di immobili precedentemente create e si vuole semplicemente evidenziare il

minimo scarto possibile tra i due valori confrontati durante il procedimento per la scelta del modello. L'unità di misura per tutti i valori sono i chilowatt [kW.]

	Min potenza termica [kW]	Max firma energetica edifici L [kW]	Taglia PdC [kW]
Merano	15,41	10,79	30
Brunico	4,13	4,05	8
Verano	4,77	3,27	12

Tabella 17

Come descritto nel capitolo 4.2, il ciclo iterativo per la selezione della taglia ottimale della pompa di calore viene interrotto quando il minimo valore della potenza termico fornita risulta maggiore del massimo valore della firma energetica. In particolare, questo confronto viene eseguito utilizzando i valori di potenza corrispondenti al minimo della temperatura esterna registrata nell'arco dell'anno. Tuttavia, se tali dati risultano anomali, l'errore si riflette direttamente sul dimensionamento, portando a risultati inaccurati.

Se le temperature minime fornite dall'anno climatico risultano eccessivamente estreme o molto distanti dalle medie stagionali, il problema non è da attribuirsi alla costruzione dell'anno tipo. Da normativa, il mese civile selezionato, tra i dieci a disposizione, presenta la statistica di Finkelstein-Schafer minore e di conseguenza è quello che rappresenta meglio l'andamento climatico del periodo. Non ha grande rilevanza se in alcune ore del periodo selezionato la temperatura si discosta notevolmente dalla media, ciò indicherà semplicemente che i mesi esclusi presentano temperature ancora più estreme nel corso dell'arco mensile.

Inoltre, per Merano il dimensionamento della pompa di calore e il picco elettrico richiesto risultano inverosimili in proporzione al valore dei gradi giorno. Per i comuni di Verano e Brunico, invece, il problema è l'opposto. La taglia proposta dall'algoritmo è sottostimata nonostante le temperature minime risultino ancor più basse. Se a delle basse temperature, proporzionali comunque ai gradi giorno della località, si associano dei consumi maggiori, allora i dati si "compensano". Facendo un confronto tra le tre località, le bollette di Verano

e Brunico presentano un utilizzo mensile di metano maggiore rispetto a Merano, al quale però è associata, in termini relativi rispetto ai gradi giorno, una temperatura minima più bassa. Ma perché una bolletta con consumi più alti aiuta, nel dimensionamento, a “compensare” delle temperature minime più basse? Per come sono state definite, la firma energetica dipende dall’opposto della temperatura rilevata e dai consumi mensili mentre la potenza termica prodotta dalla pompa di calore dalla temperatura registrata e da dei coefficienti forniti dalla scheda tecnica della macchina. Successivamente, vengono fornite entrambe le equazioni che determinano i due valori:

$$firma\ energetica = -a * T_{esterna} + b \quad (40)$$

$$P_{th} = k_1 * T_{esterna} + k_2 \quad (41)$$

Dove a e b sono due parametri ottenuti a partire dai consumi mensili mentre k_1 e k_2 due coefficienti positivi e diversi da 0. A parità di consumi, se la $T_{esterna}$ è più bassa, quindi maggiore a livello assoluto, allora anche la P_{th} prodotta dalla pompa di calore sarà minore. A parità di $T_{esterna}$, se i consumi aumentano, la firma energetica sarà maggiore. Quindi se la $T_{esterna}$ diminuisce ma al contempo i consumi aumentano, la firma energetica e la P_{th} crescono di pari passo. Se invece ad una bassa $T_{esterna}$ corrispondono consumi ridotti, i valori della firma energetica e della P_{th} non variano in modo proporzionale e il valore della prima cresce in maniera più repentina. Quest’ultima è la situazione nel comune di Merano, il quale presenta una temperatura minima registrata che non è coerente con i valori di consumo calibrati rispetto ai gradi giorno della zona. In altre parole, nonostante i consumi siano adattati ai gradi giorno, la temperatura minima risulta significativamente più bassa rispetto a quanto previsto, creando una discrepanza nel dimensionamento.

La criticità delle temperature estreme influisce negativamente anche sul calcolo del picco elettrico. Un primo tentativo per arginare il problema risulta nel considerare nella procedura non più il valore massimo della firma energetica, bensì il decimo valore più

grande. In questo modo, l'obiettivo è quello di considerare un valore della firma che non sia associato alle temperature "anomale" esterne. Questo stratagemma non risulta sufficiente, in quanto il numero di dati "sbagliati" per ogni località può essere nessuno come cento.

5.2.2 - Ulteriori problemi di dimensionamento

Per comprendere fino in fondo il problema dell'errato dimensionamento si osservino anche i risultati ottenuti per i comuni in provincia di Taranto, in *Tabella 18*, e di Roma, in *Tabella 19*. Per i comuni del Sud le taglie proposte dall'algoritmo risultano inverosimili se confrontate con quelle suggerite invece per la provincia di Bolzano. Al capoluogo di quest'ultima vengono proposte modelli di pompe che non superano i 6kW di potenza mentre il comune di Laterza arriva a 8/10kW. Questa soluzione potrebbe apparire plausibile se ipotizzassimo che il comune del Sud fosse situato in una zona montuosa. Tuttavia, l'argomentazione risulta errata, poiché i gradi giorno del capoluogo altoatesino sono 2821, mentre quelli del comune tarantino sono pari a 1995. Per fare un altro paragone, il comune del Sud Italia, risulta avere una taglia di pompa di calore pari a quella suggerita per il comune di Brunico. Anche in questo caso la differenza di gradi giorno è molto importante in quante il comune altoatesino risulta averne 4410. Inoltre poi le taglie proposte per Taranto, oltre che risultare pari a quelle di Bolzano, sono superiori a quelle che risulterebbero per il comune di Sava nonostante la differenza tra i due di gradi giorno sia davvero misera, 1521 per Taranto contro 1564 per Sava.

Altra situazione problematica è fornita dal confronto tra la taglia suggerita per il comune di Monte Compatri, in provincia di Roma, e nuovamente il comune di Bolzano. Se per il secondo la taglia suggerita è di 6kW per il primo risulta invece 4kW nonostante il valore di gradi giorno sia praticamente il medesimo, per il comune romano è pari a 2817. Altra evidenza è che per i comuni romani il risultato fornito per la taglia della pompa di calore è sempre pari a 4kW, nonostante la grande differenza di gradi giorno che intercorre tra le diverse località, Roma ha gradi giorno pari a 2023 e Casape 2742. Confrontando inoltre questi risultati con quelli del comune di Laterza, le problematiche si rendono ancor più evidenti.

A	E	I	L
Taranto Taglia PdC			
4	6	6	6
Laterza Taglia PdC			
8	8	10	10
Sava Taglia PdC			
4	4	4	4

Tabella 18

A	E	I	L
Roma Taglia PdC			
4	4	4	4
Casape Taglia PdC			
4	4	4	4
Monte Compatri Taglia PdC			
4	4	4	4

Tabella 19

Una prima risposta per risolvere tutte le problematiche messe alla luce è stata di modificare il modo in cui vengono scalate le bollette. Tale cambiamento si traduce nel sostituire i gradi giorno della media provinciale con quelli del capoluogo nell'operazione di adeguamento della bolletta. Riprendendo l'equazione adottata precedentemente e adattandola a questa soluzione:

$$\text{Consumo ottobre}_{\text{comune}} = \text{Consumo ottobre}_{\text{provincia}} * \frac{GG_{\text{comune}}}{GG_{\text{capoluogo}}} \quad (42)$$

Tale soluzione viene proposta in quanto si presuppone che i dati della bolletta media di provincia siano fortemente influenzati dai consumi del capoluogo. Essendo la località con il maggior numero di edifici all'interno della propria circoscrizione territoriale, il

capoluogo incide significativamente sul calcolo della media dei consumi di tutta la provincia. In *Tabella 20, 21 e 22* vengono riportati i risultati per i comuni rispettivamente di Taranto, di Roma e di Bolzano con questo nuovo metodo. Si nota che mentre per i comuni del Sud i valori risultano pressoché invariati, per quelli del Centro si ottiene una variazione, con un aumento di taglia, sia per Casape che per Monte Compatri. Per il comune di Merano, invece, con il nuovo metodo per scalare le bollette, il sovradimensionamento della taglia si riduce. Questo perché come si può osservare in *Tabella 31*, scalando i consumi rispetto ai gradi giorno del capoluogo, le bollette del comune di Merano presentano valori più alti rispetto all'adeguarle riferendosi ai GG medi provinciali. Di conseguenza, come è stato spiegato nel Capitolo 5.2.1, la crescita della firma energetica e della potenza termica prodotta avviene in maniera più proporzionale rispetto al metodo precedente di scalare le bollette.

A	E	I	L
Taranto Taglia PdC			
4	4	4	4
Laterza Taglia PdC			
8	8	10	10
Sava Taglia PdC			
4	4	4	4

Tabella 20

A	E	I	L
Roma Taglia PdC			
4	4	4	4
Casape Taglia PdC			
6	6	8	8
Monte Compatri Taglia PdC			
6	6	6	6

Tabella 20

A	E	I	L
Bolzano Taglia PdC			
6	6	6	6
Brunico Taglia PdC			
6	6	6	6
Verano Taglia PdC			
10	10	10	10
Merano Taglia PdC			
22	22	22	22

Tabella 22

Analizzando più a fondo i risultati, si individua che il problema di dimensionamento è legato all'adeguamento dei consumi in base al valore dei gradi giorno. Facendo riferimento ad entrambe le metodologie, gli output di taglia per i comuni con un valore di gradi giorno vicino a quello del capoluogo o a quello medio di provincia risultano verosimili, come ad esempio per Roma o Taranto o Sava. Tale affermazione non può essere fatta però per le località con un valore di gradi giorno molto diversi come il comune di Laterza o di Monte Compatri o Brunico. Il comune tarantino appena citato ha 1995 come valore dei gradi giorno mentre quello del capoluogo, Taranto, è pari a 1521, ossia il 76%, e quello medio della provincia è uguale a 1639, ovvero l'82%. La conseguenza è che nel processo di adeguamento della bolletta, in particolare per i valori mensili ottenuti rispetto ai gradi giorno medi della provincia, sono, per i mesi invernali, analoghi a quelli di comuni come Bolzano e Merano. Rispetto a quanto descritto nel Capitolo 5.2.1 per quest'ultimo, per Laterza il problema non è solo la temperatura ma pure i consumi, che non sono proporzionali ai gradi giorno ad essa attribuiti, che alterano il calcolo della firma energetica e della potenza termica. Ricapitolando, il problema dell'adeguamento delle bollette nasce quando il valore dei gradi giorno di una località è molto distante da quello medio della provincia o dal capoluogo, in quanto la bolletta viene o sopra o sottostimata. In questo modo comuni del Sud Italia, come Laterza, possono avere consumi simili a quelli di località alpine del Nord, come Bolzano o Merano.

In *Tabella 23, 24 e 25*, vengono raffigurati rispettivamente i consumi, per un anno di riscaldamento, di alcuni comuni in provincia di Taranto, Roma e Bolzano. Nella penultima colonna, denominata GG comune, vengono raffigurati i gradi giorno effettivi della località, mentre nell'ultima colonna, chiamata GG metodo, vengono rappresentati i gradi giorno rispetto ai quali vengono scalate le bollette medie di provincia. In particolare, la riga raffigurata in verde rappresenta i consumi che si ottengono scalando le bollette rispetto ai gradi giorno del capoluogo, quella blu, invece, i valori presenti in bolletta se si scala rispetto ai gradi giorno medi di provincia.

Comune	ott 21	nov 21	dic 21	gen 22	feb 22	mar 22	apr 22	mag 22	giu 22	lug 22	ago 22	set 22	GG comune	GG metodo
Taranto 74123	18	39	104	123	98	104	35	15	13	13	12	14	1521	1521
	17	36	97	114	91	97	32	14	12	12	12	13		1639
Laterza 74014	24	51	137	161	129	137	45	20	18	17	16	18	1995	1521
	22	48	127	149	119	127	42	18	16	15	15	17		1639
Sava 74028	19	40	107	126	101	107	36	16	14	13	13	14	1565	1521
	18	37	100	117	94	100	33	14	13	12	12	13		1639

Tabella 23

Comune	ott 21	nov 21	dic 21	gen 22	feb 22	mar 22	apr 22	mag 22	giu 22	lug 22	ago 22	set 22	GG comune	GG metodo
Roma 00199	18	43	79	97	74	77	37	14	12	12	12	13	2023	2023
	16	37	66	82	62	65	31	12	11	10	10	11		2401
Casape 00010	25	59	107	132	100	104	50	19	17	16	16	18	2742	2023
	21	49	90	111	85	88	42	16	14	13	13	15		2401
Monte Compatri 00077	26	60	110	135	103	107	52	20	17	16	16	18	2818	2023
	22	51	93	114	87	90	44	16	15	14	14	15		2401

Tabella 24

Comune	ott 21	nov 21	dic 21	gen 22	feb 22	mar 22	apr 22	mag 22	giu 22	lug 22	ago 22	set 22	GG comune	GG metodo
Bolzano 39100	82	115	164	173	135	120	66	22	17	15	15	19	2821	2821
	53	75	107	113	88	78	43	15	11	10	9	13		4328
Brunico 39031	128	179	257	270	211	187	103	35	26	23	23	30	4411	2821
	83	117	167	176	138	122	67	23	17	15	15	20		4328
Verano 39010	152	213	305	321	251	222	122	42	31	27	27	36	5236	2821
	99	139	198	209	163	145	79	27	20	18	18	23		4328
Merano 39012	95	134	191	202	157	140	77	26	19	17	17	23	3290	2821
	62	87	125	131	103	91	50	17	13	11	11	15		4328

Tabella 25

In definitiva scalare le bollette rispetto ai gradi giorno del capoluogo di provincia non migliora significativamente i risultati dell'algoritmo. Si decide quindi di abbandonare questa strada in quanto, a livello concettuale, meno sensata rispetto a scalare le bollette

rispetto ai gradi giorno medi della provincia essendo anche che le bollette fornite vengono calcolate eseguendo una media su tutti i consumi degli edifici della provincia e non solo su quelli del capoluogo.

5.2.3 - Implementazione algoritmo

Riassumendo le problematiche emerse negli scorsi capitoli, l'errato dimensionamento delle pompe di calore è causato principalmente da due fattori, temperature "anomale" presenti nell'anno tipo climatico e problemi nell'adeguamento dei consumi. Per risolvere le criticità conseguenti, è consigliabile affrontare i problemi separatamente.

Per quanto riguarda l'influenza dei picchi negativi di temperatura si è eseguita un'operazione di filtro dei dati. L'idea è che se ci sono solo pochi valori che si discostano dagli altri minimi, applicando un filtro, si vanno a smussare questi picchi, ottenendo così valori, in termini di valore assoluto, minori [40]. Per fare ciò, si è aggiunto un ulteriore comando al codice Matlab utilizzato per creare l'anno tipo, così come descritto nel Capitolo 3.3. Il programma dà la possibilità di utilizzare un comando che filtra i dati in maniera automatica. In questo caso si parla di un filtro di mediana. Questo viene solitamente utilizzato per eliminare il rumore da un set di dati. Il rumore, in statistica, si riferisce alla variabilità casuale o alle fluttuazioni dei dati che oscurano i modelli o i segnali sottostanti [41]. Il filtro lavora su un singolo campione andandolo a sostituire con il valore mediano dei suoi vicini, rappresentati da una cosiddetta finestra, con al centro il valore da sostituire. Di seguito viene proposto un esempio per comprendere meglio quanto appena descritto.

Si consideri il seguente set di dati $x = [2, 80, 6, 3]$. Per applicare il filtro di mediana nella maniera corretta e giungere al set di dati finali y bisogna eseguire i seguenti passaggi:

- $y[1] = \text{Mediana}[2,2,80] = 2;$
- $y[2] = \text{Mediana}[2,80,6] = \text{Mediana}[2,6,80] = 6;$
- $y[3] = \text{Mediana}[80,6,3] = \text{Mediana}[3,6,80] = 6;$
- $y[4] = \text{Mediana}[6,3,3] = \text{Mediana}[3,3,6] = 3;$
- $y = [2, 6, 6, 3].$

In questo esempio, si utilizza una finestra, rappresentata dalle parentesi quadre, di tre valori per trovare il dato mediano mentre nel codice utilizzato su Matlab essa è di trentacinque. Altre operazioni che vengono svolte sono quella di ordinare in ordine crescente i valori all'interno di una finestra e ripetere il valore nel bordo del set di dati nelle finestre che lo comprendono. Questo filtro non viene applicati ai dati rozzi, ovvero a quelli disponibili sui database di OpenMeteo, bensì sul set di valori che costituiscono l'anno tipo di temperatura.

Nel Capitolo 5.2.1 in *Figura 18*, è rappresentato l'andamento di temperatura per il comune di Merano senza l'applicazione del filtro. Ora in *Figura 21*, viene riportato il profilo di temperatura in seguito all'applicazione.

Si osserva che l'andamento dei valori filtrati, ovvero gli intervalli in cui la temperatura aumenta o diminuisce, non varia rispetto ai dati non filtrati. Ciò che si modifica è l'entità dei picchi di temperatura, di valore assoluto più basso. Si passa da un minimo intorno a -15°C a un valore pari a -7°C . In questo modo, il nuovo minimo assoluto è pari all'incirca al valore medio dei minimi nel set di dati non filtrati.

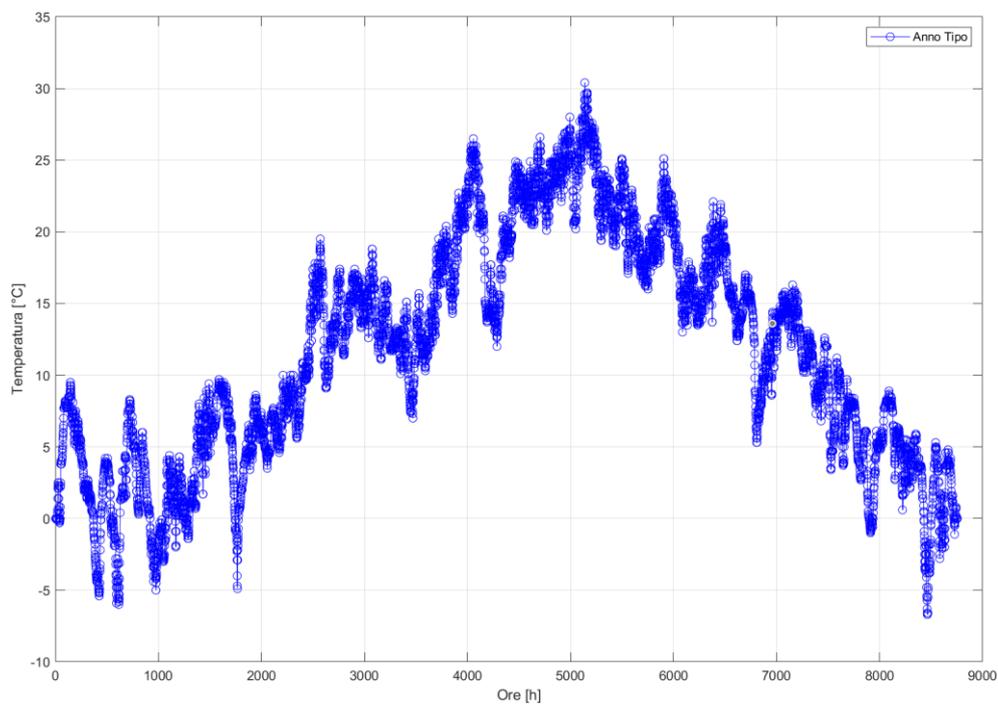


Figura 21 Andamento della temperatura dell'anno caratteristico per il comune di Merano dopo l'operazione di filtraggio

Eliminati i dati “anomali”, si eseguono nuovamente le simulazioni. Nei nuovi output forniti dall’algoritmo, viene risolto il problema dei picchi elettrici grandi svariati ordini di grandezza rispetto agli altri mentre le taglie suggerite per le pompe di calore risultano ancora non adeguate. Per comprendere cosa l’operazione di filtraggio ha cambiato si osservino in *Tabella 26* i nuovi risultati per alcuni comuni in provincia di Bolzano. Le problematiche che colpivano la località di Merano, quindi picco elettrico grande due ordini di grandezza in più rispetto agli altri e dimensione massima della pompa di calore suggerita, sono parzialmente risolte. Questo perché col nuovo set di dati i valori “anomali” vengono eliminati e si lavora con temperature che sono in linea con il numero di gradi giorno della località. Se dal un lato, l’operazione di filtraggio ha risolto questi errori di sovradimensionamento, dall’altro non ha risolto le problematiche del sottodimensionamento. Anzi, sia per Brunico che per Verano la taglia della pompa suggerita diminuisce. Inoltre, anche il calcolo del picco elettrico non risulta corretto. Se il massimo della potenza elettrica raggiunta dalla macchina non supera per nessuna delle tre località i 4kW, perché viene assegnata una taglia di pompa di calore anche di 6 o 10kW? Le problematiche relative alla scelta della taglia e al calcolo elettrico verranno trattate separatamente nei prossimi capitoli.

A	E	I	L	
Merano				
6	6	6	6	Taglia PdC
1,98	2,04	2,10	2,17	Picco elettrico
Brunico				
4	4	4	6	Taglia PdC
1,75	1,81	1,87	1,99	Picco elettrico
Verano				
10	10	10	10	Taglia PdC
3,52	3,63	3,75	3,88	Picco elettrico

Tabella 26

Per quanto riguarda il dimensionamento si rende necessario rivedere il processo iterativo alla base dell'algoritmo. Nella parte di codice che verifica se il minimo della potenza termica prodotta da uno specifico modello di pompa di calore risulta maggiore del massimo della firma energetica era stato precedentemente omesso un dettaglio. Il valore della firma energetica viene moltiplicato per un coefficiente di sicurezza. Tale parametro è stato introdotto a seguito delle numerose ipotesi formulate e dell'imprecisione dei dati disponibili ed inizialmente il suo valore è fissato pari a 1,1.

Utilizzare lo stesso coefficiente per ogni località risulta riduttivo. Non si tiene conto che ogni località parte da delle bollette diverse o che comuni nella stessa provincia scalano i consumi con un diverso valore dei gradi giorno. Per ovviare a tale problema, viene perciò associato ad ogni intervallo di gradi giorno un diverso valore del coefficiente di sicurezza. Tali range e tali coefficienti vengono individuati a tentativi in modo tale da rendere i risultati il più verosimile possibile. Punto di partenza per l'individuazione degli intervalli rimangono comunque i range che definiscono i confini delle differenti fasce climatiche. In *Tabella 27* vengono riportati i diversi range con il valore del coefficiente di sicurezza associato.

Intervalli	Coefficiente di sicurezza
0-1999	1,1
2000-2399	1,4
2400-2699	1,9
2700-2999	2,3
3000-3299	2,4
3300-3599	2,5
3600-3799	2,6
3800-6000	3,4

Tabella 27

In particolare, confrontando con i valori reali delle fasce climatiche, le classi dalla A alla D sono state inglobate in un unico intervallo e quindi associate tutte allo stesso coefficiente di sicurezza. In realtà un piccolo intervallo di cento gradi giorni della fascia D non viene compreso in questo agglomerato. Le fasce che invece hanno subito grosse

suddivisioni sono la E e la F. Analizzando questo risultato, si conviene alla conclusione che le fasce che corrispondono a climi più “caldi”, risentono meno delle approssimazioni svolte in fase di stesura dell’algoritmo. Al contrario, nelle aree climatiche in cui il riscaldamento è più rilevante, a causa della rigidità del clima, è fondamentale dare il giusto peso alle ipotesi formulate, aumentando il numero di intervalli, per garantire una maggiore sensibilità dell'algoritmo. Anche i valori del coefficiente di sicurezza tengono conto delle assunzioni fatte e il loro valore, per garantire appunto sensibilità, viene individuato a tentativi. In particolare si può osservare una crescita costante del valore del fattore moltiplicativo fino a che non si raggiunge un valore di gradi giorno superiore a 3800. A quel punto si è deciso di aumentare drasticamente il valore, in maniera tale da tenere meglio conto della rigidità del clima in quelle località.

Apportate tali modifiche al programma, si torna alla fase di simulazione. I risultati per i comuni più “problematici” per le province di Bolzano, Taranto e Roma vengono riportati rispettivamente in *Tabella 28, 29 e 30*.

Ora, finalmente, la taglia della pompa di calore suggerita per il comune di Brunico non è più inferiore a quella di Merano. Questo rappresenta un miglioramento rispetto alla situazione precedente, ma non è ancora del tutto convincente. Un altro aspetto corretto riguarda il divario tra le dimensioni delle pompe di calore nei comuni altoatesini e quelli della provincia di Taranto, che ora risulta adeguatamente proporzionato ad eccezione del comune di Laterza che necessita ancora di una taglia maggiore di quella di Bolzano. Anche per quanto riguarda le località romane, i risultati sono in linea con le previsioni.

A	E	I	L
Bolzano Taglia PdC			
6	6	6	6
Brunico Taglia PdC			
22	22	22	22
Verano Taglia PdC			
30	30	30	30
Merano Taglia PdC			
22	22	22	22

Tabella 28

A	E	I	L
Taranto Taglia PdC			
4	4	4	4
Laterza Taglia PdC			
8	8	10	10
Sava Taglia PdC			
4	4	4	4

Tabella 29

A	E	I	L
Roma Taglia PdC			
4	4	4	4
Casape Taglia PdC			
6	6	6	6
Monte Compatri Taglia PdC			
4	6	6	6

Tabella 130

5.2.4 - Adeguamento delle bollette e del picco elettrico

Le strategie adottate finora non riescono a risolvere completamente le problematiche legate al dimensionamento. Il comune di Bolzano risulta avere come taglia suggerita dall'algoritmo un modello minore rispetto a quello di Laterza nonostante i gradi giorno della prima località siano pari a 2821 mentre quelli della seconda a 1995. Tale risultato non trova riscontro nemmeno confrontando l'andamento di temperatura tra i due comuni. In *Figura 22* e *23* si possono osservare rispettivamente gli andamenti del comune altoatesino e di quello del Sud. Il minimo di temperatura per Bolzano si assesta intorno ai -5°C mentre per Laterza si arriva leggermente sotto lo zero, attorno a -1°C .

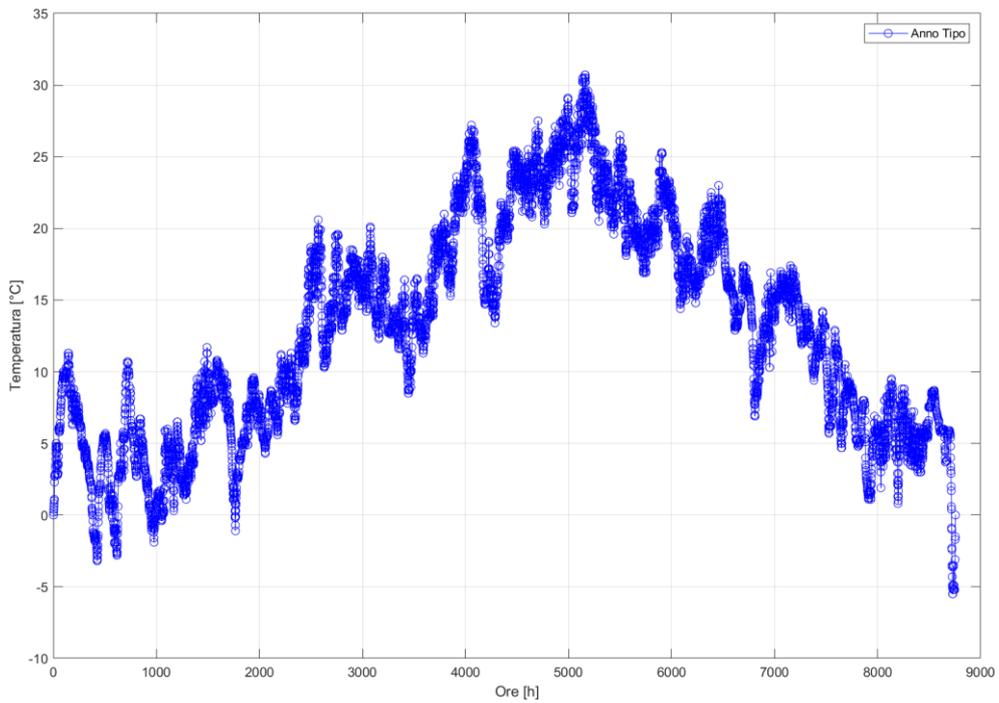


Figura 22 Andamento della temperatura dell'anno caratteristico per il comune di Bolzano

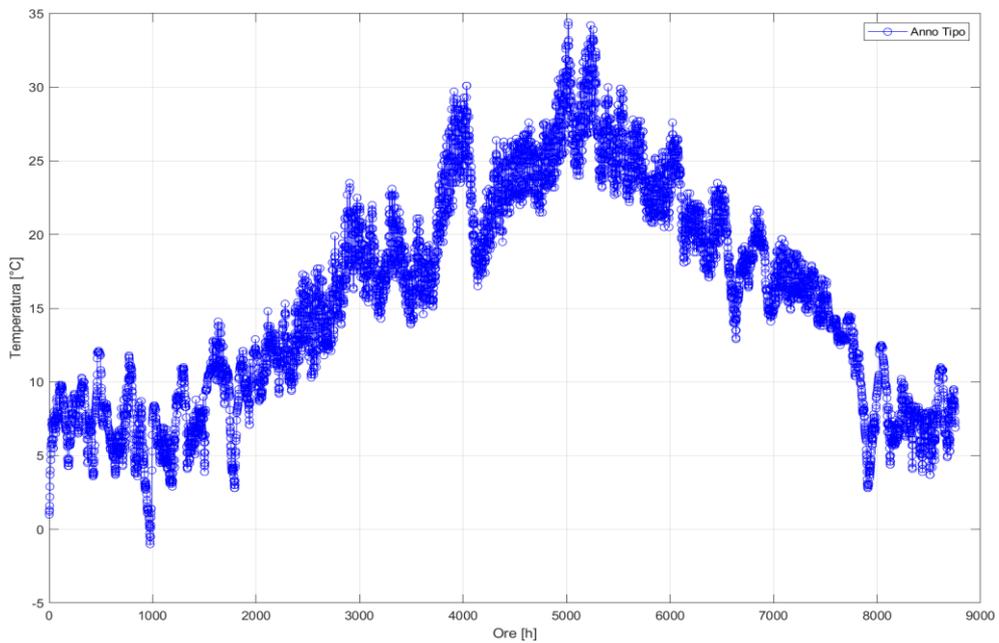


Figura 23 Andamento della temperatura dell'anno caratteristico per il comune di Laterza

L'unico aspetto su cui è ancora possibile intervenire è il metodo di adeguamento delle bollette. In questo contesto, si adotta un approccio simile a quello utilizzato per la

creazione di diversi coefficienti di sicurezza in base alle fasce climatiche. Lavorando con queste ultime, risulta più sensato abbandonare le bollette basate sui consumi medi provinciali, preferendo invece quelle che rappresentano l'intera area climatica di riferimento. Per associare la bolletta standard a ogni località, è innanzitutto necessario calcolare il numero di gradi giorno ad essa collegati e successivamente caricare i consumi corrispondenti.

A questo punto cambia radicalmente il metodo con il quale vengono adeguata le bollette. Verranno sì ancora considerati nel calcolo il valore dei gradi giorno associati alla località ma non più né quelli del capoluogo e nemmeno quelli della media provinciale. Basti semplicemente pensare che le bollette riferite alle fasce climatiche comprendono al loro interno diversi capoluoghi e pure diverse province. Al posto di questi valori, vengono utilizzati dei gradi giorno di riferimento per ogni fascia climatica. Per esempio, per la zona A, che è compresa in un intervallo compreso tra 0 e 600, si assume come valore 300 GG. E non è tutto, per aumentare la sensibilità dell'algoritmo, le diverse fasce climatiche vengono divise in vari intervalli. In questo modo si riesce a limitare anche un altro problema. Rispetto a prima non potrà più succedere che la differenza tra i gradi giorno della località sotto studio e quelli di riferimento per quella zona climatica siano eccessivamente distanti, in questo modo i consumi non saranno più ulteriormente sopra o sotto stimati. L'unica fascia climatica che non risente eccessivamente di queste divisioni è la F. Nelle bollette medie di quella classe, le località con un valore di gradi giorno davvero elevato, quindi oltre i 4000, sono davvero poche e quindi incidono in misura minima sulla media dei consumi. Se si suddividessero ulteriormente gli intervalli e si designassero via via valori di gradi giorno di riferimento sempre più elevati, si rischierebbe che le località con gradi giorno elevato debbano scalare delle bollette influenzate principalmente dai consumi di località con valori vicini al limite inferiore dell'intervallo. Il rapporto tra i gradi giorno della località e quelli di riferimento risulterebbe quindi molto basso, portando all'assegnazione di bollette inadeguate che sottostimano significativamente i consumi reali.

Intervalli	Gradi giorno riferimento
0-600	300
601-900	750
901-1400	1150
1401-1800	1600
1801-2100	2000
2101-2600	2350
2602-3000	2800
3001-6000	3100

Tabella 141

Altra problematica emersa nell'analisi dei risultati è il valore del picco elettrico richiesto dalle pompe di calore. Inizialmente, per i comuni con dati di temperatura troppo estremi il valore del picco risultava di ordini di grandezza troppo elevato. Successivamente dopo aver attenuato quel problema, il valore del picco elettrico aveva la problematica di presentare valori eccessivamente bassi. Per risolvere questa criticità si prende spunto da ciò che viene fatto nel Capitolo 5.2.3, dove sono stati aggiunti dei coefficienti di sicurezza nel dimensionamento della pompa di calore. Questi fattori moltiplicativi dovrebbero essere applicati anche nel calcolo del picco elettrico. Quest'ultimo valore dipende dal valore massimo della firma energetica e se questa è stata precedentemente incrementata, è logico estendere questo approccio anche al calcolo del picco elettrico. Il valore del picco elettrico, che altro non è che la potenza elettrica massima richiesta dalla pompa di calore, viene quindi moltiplicato per lo stesso coefficiente di sicurezza descritto in *Tabella 27*.

Risolti i problemi di dimensionamento della taglia e della sovrastima del picco elettrico, si riportano i nuovi valori dei comuni campione. In *Tabella 32, 33 e 34*, sono presentati rispettivamente i comuni in provincia di Bolzano, Roma e Taranto.

A	E	I	L	
Bolzano				
8	8	8	10	Taglia PdC
2,89	2,98	3,08	3,11	Picco elettrico
Brunico				
22	22	22	22	Taglia PdC
12,38	12,77	13,17	13,33	Picco elettrico
Verano				
30	30	30	30	Taglia PdC
30	30	30	30	Picco elettrico
Merano				
22	22	22	22	Taglia PdC
9,28	9,58	9,87	9,99	Picco elettrico

Tabella 32

A	E	I	L	
Roma				
4	4	4	4	Taglia PdC
1,27	1,31	1,35	1,37	Picco elettrico
Casape				
6	6	6	6	Taglia PdC
1,87	1,93	1,99	2,02	Picco elettrico
Monte Compatri				
4	6	6	6	Taglia PdC
1,63	1,68	1,86	1,88	Picco elettrico

Tabella 33

A	E	I	L	
Taranto				
4	4	4	4	Taglia PdC
1,28	1,32	1,36	1,37	Picco elettrico
Laterza				
8	8	8	8	Taglia PdC
2,57	2,65	2,73	2,77	Picco elettrico
Sava				
4	4	4	4	Taglia PdC
1,28	1,32	1,36	1,38	Picco elettrico

Tabella 34

5.3 - Risultati finali simulazione

A seguito delle modifiche apportate per migliorare la sensibilità dell'algoritmo, si estende la simulazione al resto dei comuni italiani. I risultati vengono raggruppati in *Figura 24*, dove viene rappresentata la distribuzione delle pompe di calore in base alla potenza installata. Ogni punto sulla cartina rappresenta una località e il colore varia in base alla taglia installata. La legenda della *Figura 24* spiega quale potenza è associata a ciascun colore, aiutando l'osservatore a capire immediatamente dove si trovano le installazioni più grandi o più piccole.

Come si può osservare, in tutte le località dell'arco alpino, la taglia suggerita dall'applicativo è pari o maggiore di 18kW. Per quanto riguarda i comuni della Pianura Padana, l'algoritmo suggerisce una potenza variabile tra gli 10 e i 16kW ad eccezione delle località situate vicino a grandi masse d'acqua, che rendono la temperatura più mite. Sono quindi un esempio le zone adiacenti al Mare Adriatico e al Tirreno ma anche i comuni nelle vicinanze del Lago Maggiore, di Garda e di Como dove la taglia consigliata è tra i 6 e gli 8kW.

Le potenze suggerite per i comuni del Centro Italia variano tra i 4 e i 12kW ad eccezione delle località situate sugli Appennini, dove la taglia della pompa di calore è superiore rispetto alle zone marittime.

Infine i risultati mostrano che, per i comuni marittimi del Sud e delle Isole, la taglia più frequentemente proposta è quella da 4 kW. Tuttavia, nelle aree interne della Sardegna, della Sicilia e lungo l'Appennino meridionale, il valore tende ad essere leggermente superiore.

In generale, l'algoritmo fornisce risultati apprezzabili sulla maggior parte del territorio. Suggerisce taglie maggiori al Nord e via via sempre minori spostandosi verso Sud, dove la temperatura media tende ad alzarsi. Tuttavia, sono presenti dei dimensionamenti che non risultano verosimili e dove la taglia viene sovradimensionata. Sono un esempio alcuni comuni delle Marche, della Sardegna, della Sicilia e della Basilicata. Per questi, le precauzioni prese filtrando i dati di temperatura e aggiungendo dei coefficienti di sicurezza non sono sufficienti. L'unica soluzione per risolvere queste criticità è poter far riferimento a delle bollette più specifiche di quelle zone e avere a disposizione dei dati meteorologici più precisi.

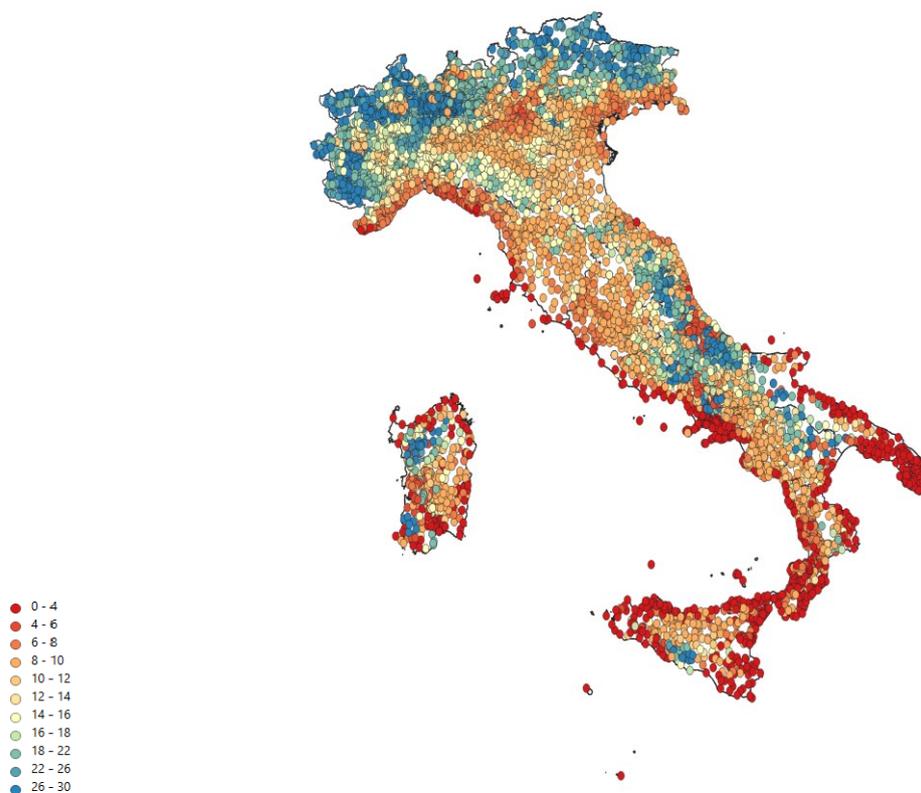


Figura 24

Per verificare che l'andamento dei risultati sia corretto, si può analizzare il set di dati in due modi. Confrontare la taglia ottenuta coi i gradi giorno della località oppure dimensionare nuovamente le pompe di calore utilizzando un secondo metodo. Viene quindi adottata la metodologia di pre-dimensionamento suggerita dall'azienda Vaillant [42]. L'equazione che si utilizza è la seguente:

$$P_{th} = \frac{Fabbisogno_{termico} * (20 - T_{minima\ progetto})}{GG * Ore_{riscaldamento}} \quad (43)$$

Dove P_{th} è la potenza termica richiesta alla pompa di calore, $T_{minima\ progetto}$ è un parametro progettuale caratteristico di ogni località ed è specificato nella norma UNI 5364 [mettere bibliografia], GG sono i gradi giorno del comune sotto studio. Le ore di riscaldamento sono, per ipotesi semplificativa spiegata al Capitolo 4.1, 24. Di seguito si confrontano i risultati per i comuni di Sondrio, Messina, Trieste, Trento e Roma. Queste località sono state scelte in modo tale da presentare ognuna una $T_{minima\ progetto}$ diversa dall'altra. In *Tabella 35* vengono riassunti i valori e i risultati.

	Sondrio	Messina	Trieste	Trento	Roma
Fabbisogno Termico	21804	3521	14407	19608	4126
Temperatura Minima	-10	5	-5	-12	0
Gradi Giorno	3150	1334	2526	2862	2098
Ore Riscaldamento	24	24	24	24	24
Potenza PdC	9	2	6	9	2

Tabella 35

Come si può osservare dai risultati, la taglia proposta aumenta spostandosi da Sud verso Nord, così come avviene per i risultati forniti dall'algoritmo. Si vuole allora confrontare i risultati forniti dall'algoritmo e dalla nuova equazione. In *Figura 25* viene così raffigurata la differenza di taglia proposta dai due metodi, dal valore proposto dall'algoritmo viene sottratto quello proposto dal secondo metodo. Come si può osservare dalla legenda, la differenza tra la potenza suggerita risulta attestarsi sui 3kW per la maggioranza delle località italiane. Tuttavia, i risultati assumono valori molto diversi nel caso dei comuni presenti in fascia montana o caratterizzati da un alto numero di gradi giorno. Questa differenza è dovuta al diverso metodo di calcolo seguito. Nel metodo utilizzato dall'algoritmo, la taglia della pompa di calore viene selezionata in base al valore massimo della firma energetica, corrispondente alla temperatura esterna minima. Al contrario, con la metodologia proposta da Vaillant, si considera il fabbisogno termico complessivo. In questo approccio, non si fa più riferimento a un singolo valore massimo, ma a un intervallo di valori che rappresentano l'intero fabbisogno energetico e che uniti mitigano l'influenza dei valori estremi.

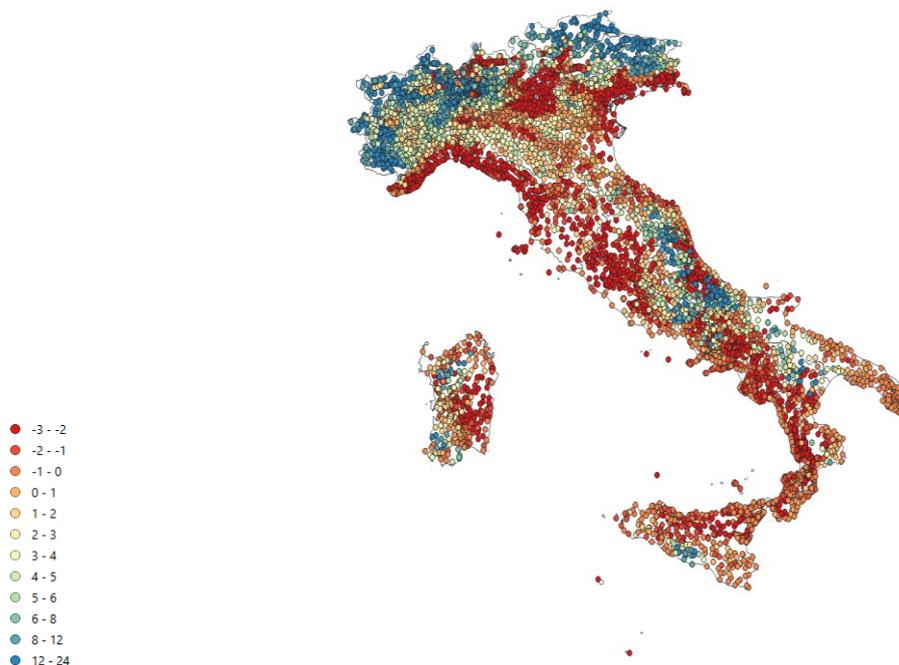


Figura 25

I risultati forniti dalle due metodologie, quindi, risultano molto simili ad eccezione di alcune zone. Si prosegue questa analisi, confrontando il valore della taglia proposta con il valore di

gradi giorno della località sotto studio. L'intento di questo confronto è valutare se rispetto alla zona climatica, la potenza installata risulta coerente. In *Figura 26*, tramite una rappresentazione grafica a pallini, vengono esposti i risultati. Le località contrassegnate da pallini di colore rosso sono quelle zone, dove a causa dell'imprecisione dei dati a disposizione, la pompa di calore risulta sovradimensionata. Infatti il rapporto tra il valore dei gradi giorno e la potenza installata è molto basso, a causa del basso valore di gradi giorno e dell'alto della taglia. Un esempio è la città di Ravanusa, in provincia di Agrigento, Sicilia, alla quale viene associata una pompa di calore di 30kW quando però il valore di gradi giorno risulta solamente 1898. Da segnalare anche l'estremo opposto, ovvero il caso in cui il rapporto è molto grande. Queste località sono caratterizzate da pallini blu e il valore risulta elevato in quanto nonostante un basso numero di gradi giorno, quello della taglia suggerita risulta in proporzione ancora più basso. È un esempio la città di Caltanissetta, alla quale viene associata una taglia pari a 4 e il valore di gradi giorno risulta pari a 2273. A differenza del precedente caso, non è da ritenersi un errore, semplicemente il basso valore della pompa di calore non permette di ottenere un rapporto inferiore. Infine, le località con un rapporto intermedio tra quello massimo e minimo, sono quelle per cui il dimensionamento è risultato più efficace e la taglia proposta è proporzionale al valore dei gradi giorno.

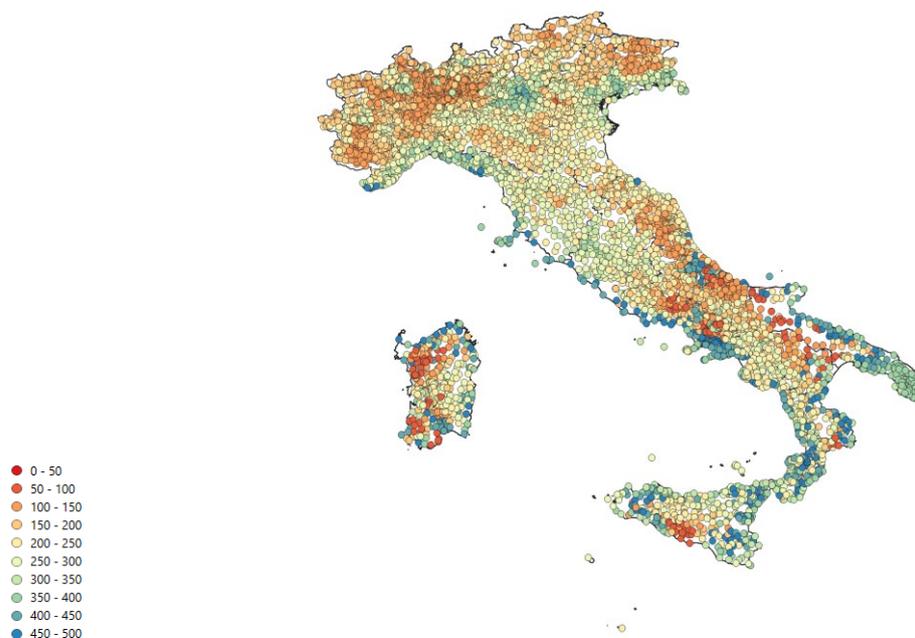


Figura 26

CONCLUSIONI E POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

Questa tesi si inserisce all'interno di un progetto volto allo sviluppo di un'applicazione per valutare le prestazioni di una caldaia domestica in confronto ai vari modelli di pompe di calore presenti sul mercato. L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di gettare le basi per lo sviluppo dell'applicativo, identificando i dati di input da richiedere all'utente, raccogliendo le informazioni necessarie per il calcolo delle prestazioni energetiche attraverso vari database, implementando un modello matematico per la valutazione delle diverse tecnologie di riscaldamento, e infine validandolo.

Nella fase di creazione del database delle caldaie i dati sono stati recuperati dai modelli presenti sul mercato mentre per la realizzazione di quello climatico i valori sono stati reperiti da degli archivi disponibili sul web e successivamente elaborati secondo normativa per la creazione di un anno climatico medio. A seguito dell'analisi parametrica emerge che talvolta questi dati risultano imprecisi. Risulterebbe quindi più opportuno affidarsi a delle banche dati realizzate da istituti meteorologici.

Per quanto riguarda, infine, i valori forniti dal modello matematico, i risultati sono in linea con le previsioni. Se lo stesso edificio viene costruito in diverse aree della Penisola, è logico aspettarsi che il fabbisogno termico aumenti man mano che si procede da Sud verso Nord. Questo si traduce in una maggiore richiesta di potenza per le pompe di calore, con taglie suggerite che aumentano di conseguenza. Per determinare con precisione la dimensione appropriata della pompa di calore necessaria per l'abitazione, è fondamentale effettuare valutazioni più approfondite e disporre di dati più accurati.

I dati di consumo, dai quali è stato possibile valutare il fabbisogno termico, derivano dalle bollette medie fornite da ARERA. La manipolazione effettuata ha prodotto i risultati attesi, evidenziando una differenziazione dei consumi in base alla zona climatica di appartenenza. Tuttavia, per ottenere risultati più accurati, sarebbe opportuno fare riferimento a dati di consumo reali.

Uno sviluppo futuro dell'applicativo riguarda il miglioramento del modello di calcolo dei consumi energetici. Tra i dati richiesti all'utente vi è la metratura e l'altezza delle stanze da riscaldare. Queste informazioni permettono di calcolare il volume dell'ambiente e,

attraverso l'implementazione di un modello per lo studio delle dispersioni termiche, è possibile determinare la potenza oraria necessaria a garantire il comfort termico in relazione alla temperatura esterna. Questo approccio può essere applicato alle caldaie a punto fisso e successivamente esteso a quelle con regolazione a curva climatica. Conoscendo la potenza richiesta e la temperatura di mandata, si può calcolare la portata d'acqua necessaria per soddisfare il fabbisogno termico, migliorando così la stima dei consumi orari. La temperatura di ritorno viene generalmente fissata in funzione di quella di mandata per massimizzare la resa termica del radiatore. Migliorare la stima dei consumi influisce successivamente anche sul calcolo della firma energetica e di conseguenza sul dimensionamento della pompa di calore.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Il fabbisogno energetico globale degli edifici Michele De Carli, Antonino Di Bella
Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Padova
<https://www.poroton.it/pdf/1269/fabbisognoenergetico.pdf>
- [2] Accordo di Parigi (2015). Wikipedia.
[https://it.wikipedia.org/wiki/Accordo_di_Parigi_\(2015\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Accordo_di_Parigi_(2015))
- [3] Protocollo di Kyoto. Wikipedia. https://it.wikipedia.org/wiki/Protocollo_di_Kyoto
- [4] Raccomandazione per l'obiettivo per il 2040 di conseguire la neutralità climatica entro il 2050. (2024, February 6). Commissione Europea.
https://commission.europa.eu/news/recommendation-2040-target-reach-climate-neutrality-2050-2024-02-06_it
- [5] Energy efficiency targets. Energy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-targets_en
- [6] Energy Performance of Buildings Directive. Energy.
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [7] <https://www.ingenio-web.it/articoli/guida-alla-direttiva-case-green-epbd-iv/>
- [8] Energy Efficiency Directive. Energy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
- [9] <https://www.qualenergia.it/articoli/direttiva-epbd-tutti-dati-conoscere-edifici-italiani/>
- [10] Antonella. Energia: da ENEA linee guida su tetti e pareti verdi per le PA. Media ENEA. <https://www.media.enea.it/comunicati-e-news/archivio-anni/anno-2024/energia-da-enea-linee-guida-su-tetti-e-pareti-verdi-per-le-pa.html>
- [11] Refat, V. Energia: ENEA nel progetto europeo per facilitare la riqualificazione. ENEA - Dipartimento Unità per L'efficienza Energetica.
<https://www.efficienzaenergetica.enea.it/vi-segnaliamo/energia-enea-nel-progetto-europeo-per-facilitare-la-riqualificazione-degli-immobili.html>
- [12] A. Boriani, W. Cariani, R. Romani, “Guida pratica alla ristrutturazione e riqualificazione energetica degli edifici”, Agenzia Nazionale Efficienza Energetica – ENEA, febbraio 2020
- [13] Redazione. (2023, July 10). EHPA diffonde l'ultimo European Heat Pump Market and Statistics Report. GT – Il Giornale Del Termoidraulico.
<https://www.ilgiornaledeltermoidraulico.it/ehpa-diffonde-lultimo-european-heat-pump-market-and-statistics-report/>

- [14] Regolamento (UE) 2022/2577 del Consiglio del 22 dicembre 2022 che istituisce il quadro per accelerare la diffusione delle energie rinnovabili <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32022R2577>
- [15] Caldaia: componenti e caratteristiche | Viessmann IT. (2024, May 30). <https://www.viessmann.it/it/approfondimenti/caldaia.html>
- [16] Silvia, & Silvia. (2021, June 7). Caldaie a camera aperta o stagna: quali sono le differenze? - eTerra. eTerra. <https://eterra.it/caldaie-camera-aperta-o-stagna/>
- [17] Caldaia a condensazione <https://residenziale.viessmannitalia.it/come-funziona-una-caldaia-a-condensazione>
- [18] Rossi, E. (2022, December 7). Caldaia a condensazione e caldaia tradizionale: tutte le differenze. Tavolla - Forniture per La Casa. <https://www.tavolla.com/magazine/che-differenza-c-e-tra-la-caldaia-a-condensazione-e-normale/>
- [19] Now, R. I. (2024, February 8). Quanto deve essere la pressione dell'acqua in una caldaia? | IRSAP NOW. IRSAP NOW. <https://now.irsap.com/it/riscaldamento/pressione-acqua-caldaia>
- [20] Immobiliare.it News. (2024, October 10). Utenze e Bollette - Immobiliare.it News. <https://www.immobiliare.it/news/economia/utenze-e-bollette/>
- [21] UNI EN 442-2:2015 - UNI Ente Italiano di Normazione. <https://store.uni.com/uni-en-442-2-2015#:~:text=La%20presente%20norma%20definisce%20i%20procedimenti%20per%20determinare,calore%20separata%2C%20con%20temperatura%20minore%20di%20120%20%C2%B0C.>
- [22] REFPROP | NIST. (2024, August 14). NIST. <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- [23] Regolazione della temperatura di mandata | Caleffi Idraulica. (n.d.). <https://idraulica.caleffi.com/articolo/regolazione-della-temperatura-di-mandata>
- [24] The state of renewable energies in Europe Edition 2018 https://www.euroobserver.org/wp-content/uploads/The_State_of_RES_in_Europe_2018_v2.pdf
- [25] Riva G.; Murano G.; Corrado V.; Baggio P.; Antonacci G. - Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane - (2010), pp. -290
- [26] Free Open-Source Weather API | Open-Meteo.com. <https://open-meteo.com/>
- [27] Migdmy. (2023, November 10). Funzione di ripartizione empirica: una guida pratica -. Pulse Of The Blogosphere. [https://iccvitella.it/funzione-di-ripartizione-empirica/Funzione di ripartizione empirica](https://iccvitella.it/funzione-di-ripartizione-empirica/Funzione%20di%20ripartizione%20empirica) <https://iccvitella.it/funzione-di-ripartizione-empirica/>
- [28] Gazzetta Ufficiale. (1993, October 14). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg>

- [29] Stato, I. P. E. Z. D. (1999, December 21). DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 21 dicembre 1999, n. 551 - Normattiva.
<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.del.presidente.della.repubblica:1999-12-21;551!vig=>
- [30] Decreto ministeriale del 6 ottobre 2022, n.383 “Piano nazionale contenimento dei consumi di gas nazionale - Misura di contenimento del riscaldamento”. | Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica.
<https://www.mase.gov.it/content/decreto-ministeriale-del-6-ottobre-2022-n-383-piano-nazionale-contenimento-dei-consumi-di>
- [31] Gazzetta Ufficiale. (2013, June 27).
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/06/27/13G00114/sg>
- [32] Comitato Termotecnico Italiano, UNI 11300 parte I, II, III, IV, Prestazioni energetiche degli edifici, Ottobre 2014
- [33] Milena. (2022, December 16). Cos’è la firma energetica e a cosa serve. Lumi.
<https://www.lumi4innovation.it/firma-energetica/>
- [34] Tecnica, R. (2024, January 22). COP della pompa di calore: cos’è e perché è importante. BibLus. <https://biblus.acca.it/cop-pompa-di-calore-cos-e/>
- [35] La filiera fotovoltaica e le varie tipologie di pannelli fotovoltaici A Damiano-2008-sardegna. https://www.sardegna.ricerche.it/documenti/13_116_2009051709220_0.pdf
- [36] Pannelli fotovoltaici e inquinamento termico FAliprandi-2010-academia.edu
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32106428/Pannelli_fotovoltaici_e_inquinamento_termico-libre.pdf
- [37] Giunzione p-n e conversione fotovoltaica
http://www.die.ing.unibo.it/pers/ribani/elettrotecnica-GM/giunzione_pn.pdf
- [38] Dimensioni pannelli fotovoltaici: tutte le misure. (2023, December 10).
<https://www.sorgenia.it/guida-energia/dimensioni-pannelli-fotovoltaici>
- [39] Efficienza energetica negli edifici | Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica. <https://www.mase.gov.it/energia/efficienza-energetica/edifici>
- [40] Filtro mediano. Wikipedia. https://it.wikipedia.org/wiki/Filtro_mediano
- [41] Il rumore in statistica <https://it.statisticseasily.com/>
- [42] Dimensionamento e potenza delle pompe di calore: come valutarli?
<https://www.vaillant.it/home/approfondimenti-e-consigli/guide/dimensionamento-e-potenza-pompe-di-calore-come-valutarli/>