

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Isole di calore, la
regolamentazione RE2020 e i
fabbisogni termici degli edifici**



Relatore

Prof. Marco MASOERO

Prof. Mathieu CREYSSELS

Candidato

Lorenzo MANGINI

Dicembre 2020

Sommario

Questo rapporto analizza il fenomeno delle isole di calore, analizzando in particolare l'impatto del condizionamento aerotermico sull'aumento della temperatura nelle città; la presenza dell'energia geotermica e la sua corretta implementazione nel motore di calcolo sviluppato per la futura regolamentazione ambientale francese RE2020; la variazione della domanda di calore legata alla modalità di riavvio del riscaldamento attraverso simulazioni effettuate con l'ambiente di simulazione TRNSYS su un edificio di tipo ufficio, considerando gli effetti che questa può avere nell'ipotesi in cui si impieghi un sistema geotermico; la variazione del coefficiente di prestazione di una pompa di calore aerotermica a causa della penalizzazione causata dallo sbrinamento e dal carico parziale.

Ringraziamenti

Prima di tutto, vorrei ringraziare Xavier Moch per essere stato molto disponibile durante lo stage per confrontare i risultati ed instaurare dibattiti costruttivi.

Jean Loup Lacroix per la fiducia che ha riposto in me e per la disponibilità offerta.

Infine, vorrei ringraziare l'associazione AFPG per avermi permesso di analizzare per la prima volta un contesto associativo in un ambito impegnato.

Indice

Elenco delle tabelle	VIII
Elenco delle figure	X
1 Introduzione	1
1.1 Contesto generale dello stage e della società	2
1.1.1 AFPG	2
1.1.2 La geotermia	3
1.1.3 Obiettivo dello stage	4
2 Le isole di calore urbane	5
2.1 Il fenomeno	5
2.2 Meccanismi di riscaldamento urbano	6
2.3 Il contributo della climatizzazione alle isole di calore	7
2.3.1 Effetto della climatizzazione sull'isola di calore di Parigi	8
2.3.2 Fattori che possono incidere sulle isole di calore in futuro	10
2.3.3 L'effetto delle isole di calore sulla domanda energetica	11

2.3.4	Confronto tra un sistema di raffreddamento convenzionale e un sistema a pompa di calore geotermica	13
2.3.5	Interazione tra le isole di calore e le onde di calore	13
2.3.6	Conclusione	15
3	RE2020	17
3.1	Il motore di calcolo	19
3.2	L'energia geotermica nel motore di calcolo	20
3.2.1	Geotermia attiva	21
3.2.2	Geocooling	22
3.2.3	Considerazioni	23
4	Simulazioni termiche con TRNSYS	25
4.1	Sviluppo del modello dell'edificio	26
4.1.1	Trnsys 3d	27
4.2	TRNBuild	29
4.3	Simulation studio	36
4.4	Implementazione di un'accensione programmata del riscaldamento .	38
4.4.1	Valore delle dispersioni di volume	39
4.4.2	Temperatura di consegna	41
4.5	Risultati con TRNSYS	44
4.5.1	Analisi dei risultati	47
4.6	Predimensionamento di un sistema di riscaldamento	47
4.7	Lunghezza delle sonde da posare	50

4.8	Conclusione	50
5	Variazione del COP di una pompa di calore aerotermica	51
5.1	COP macchina reale	52
5.2	Lo sbrinamento	53
5.3	Il carico parziale	55
5.4	COP totale	57
5.5	Conclusione	58
6	Conclusione	59
A	TRNSYS INPUT FILE	60
	Bibliografia	67

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto tra gli effetti conseguenti all'applicazione di due diverse tecnologie per il raffreddamento: una pompa di calore geotermica e una pompa di calore idrotermica	13
3.1	Edifici impiegati per le simulazioni	20
4.1	Casi analizzati	26
4.2	Casi analizzati	26
4.3	Ventilation	32
4.4	Valori degli apporti di energia interni	34
4.5	Valori di potenza installata	41
4.6	Risultati relativi all'energia utilizzata e alla potenza da impiegare per i diversi casi	47
4.7	Ipotesi per il sistema di riscaldamento	48
4.8	Consumo di elettricità e potenza elettrica massima	49
4.9	Lunghezza delle sonde da posare per i differenti casi	50
5.1	Ipotesi per il calcolo del COP	51
5.2	Test per la definizione del coefficiente di correzione del COP	53

5.3	Dimensionamento della pompa di calore	56
5.4	COP stagionale	57

Elenco delle figure

1.1	Schema di un sistema geotermico	3
2.1	Ciclo vizioso	8
2.2	L'isola di calore a Parigi secondo i diversi scenari	9
2.3	Variazione della temperatura nei diversi scenari nel periodo dell'onda di calore del 2003, per un quartiere di Parigi.	10
2.4	Consumo di energia per il raffreddamento degli edifici	11
2.5	Profili di domanda di elettricità medi in inverno ed estate in California	12
2.6	Le previsioni di Meteo France sulle future onde di calore	14
2.7	Confronto tra le temperature medie e quelle durante l'ondata di calore	15
2.8	Geocooling	16
3.1	Maestro	19
3.2	Definizione della sorgente a monte	21
4.1	Modello 3D dell'edificio	27
4.2	Separazione delle zone termiche	28
4.3	TRNBuild Navigator	29

4.4	External wall	30
4.5	Occupazione durante le ore di lavoro	31
4.6	Zona termica	35
4.7	Simulation Studio	36
4.8	Evoluzione della temperatura a Parigi durante l'anno	37
4.9	Evoluzione della temperatura di consegna e di quella effettiva	39
4.10	Schedule per la definizione della temperatura di consegna	42
4.11	Temperature delle zone termiche per il caso 1a	44
4.12	Evoluzione delle temperature per il mese di gennaio. Sono rappresentate le temperature per le diverse zone del caso 1a.	45
4.13	Confronto tra i fabbisogni energetici per il riscaldamento. In alto il caso 1a, in basso il caso 1b	45
5.1	Variazione del coefficiente di correzione del COP in funzione della temperatura e dell'umidità	54
5.2	Domanda energetica dell'edificio e capacità della pompa di calore	55
5.3	COP totale	57

Capitolo 1

Introduzione

In questa tesi, presento il lavoro svolto durante i sei mesi di stage all'AFPG, l'associazione francese che coordina le aziende che operano nel campo della geotermia. Per integrarmi meglio in un ambiente di lavoro, ho trascorso la maggior parte del mio stage presso StrateGéo, una società che collabora con AFPG.

Il lavoro è stato principalmente autonomo, articolato su diversi obiettivi definiti all'inizio dello stage, volti a soddisfare le diverse esigenze dell'associazione.

Sebbene l'autonomia mi ha permesso di gestire ed organizzare a mio piacimento il lavoro, ha comportato numerose volte la necessità di risolvere i problemi da solo e da questo ho imparato a gestire il tempo e ad analizzare i problemi in modo analitico. Anche se mi sono stati assegnati molti compiti, posso riassumerli in quattro obiettivi principali.

La prima parte dello stage si è concentrata sulla ricerca di informazioni sulle isole di calore, un fenomeno che porta al surriscaldamento della temperatura a livello urbano. Il lavoro di ricerca è stato realizzato anche contattando società di consulenza che hanno realizzato studi, come E6 e APUR. Partendo dalla caratterizzazione del problema, la ricerca si è concentrata sulle possibili soluzioni e in particolare sul contributo positivo che può avere l'energia geotermica nella sua mitigazione.

La seconda parte del lavoro mirava a verificare l'inclusione dell'energia geotermica nella regolamentazione ambientale RE2020, che entrerà in vigore nel 2020. Al fine di definire i requisiti della RE2020 per i nuovi edifici, è stato sviluppato un software per eseguire delle simulazioni e stabilire gli indici e i limiti relativi all'impatto ambientale delle nuove costruzioni. L'AFPG ha richiesto l'uso di questo strumento, che mi è stato fornito al fine di comprendere gli aspetti critici relativi all'implementazione dell'energia geotermica nella futura regolamentazione.

La terza parte del corso è stata caratterizzata da una serie di simulazioni con il software TRNSYS volte a definire le dispersioni e le esigenze termiche di un edificio tipo ufficio al fine di ottenere valori di riferimento adottando differenti modalità di avvio del riscaldamento. Inoltre, sono state sviluppate simulazioni per verificare quali sono i fattori che hanno la maggiore influenza sul consumo di energia nel caso in cui si scelga di installare un sistema geotermico.

Per concludere, l'ultima parte dello stage è stata caratterizzata dallo sviluppo di un rapido modello per stimare la riduzione del coefficiente di rendimento di una pompa di calore aerotermica a causa dello sbrinamento e della penalità legata al carico parziale.

1.1 Contesto generale dello stage e della società

1.1.1 AFPG

L'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) è stata creata il 15 giugno 2010 a Parigi. Conta un centinaio di membri che rappresentano le diverse professioni dell'energia geotermica nella Francia metropolitana: foratori, produttori e installatori di pompe di calore, gestori di reti di calore, studi di ingegneria, università e organizzazioni di ricerca, produttori di attrezzature, investitori.

È organizzata in due filiere:

- Geotermia di superficie
- Geotermia profonda

Il ruolo dell'AFPG è quello di promuovere e accelerare l'uso dell'energia geotermica, un'energia rinnovabile, naturale, pulita, disponibile e locale. Inoltre, questa energia permette la produzione di calore e di freddo in un contesto superficiale e di calore e/o elettricità in profondità.

L'AFPG si è posta l'obiettivo di promuovere l'uso dell'energia geotermica. Le sue attività possono essere suddivise in quattro aree principali:

- Rappresentare e federare i professionisti della filiera nella Francia metropolitana

- Informare le comunità, l'industria e gli individui delle risorse e della diversità dell'offerta della geotermia
- Sostenere le autorità pubbliche in termini di regolamentazione, legislazione e certificazione
- Contribuire all'emergere di nuove tecnologie

1.1.2 La geotermia

L'energia geotermica è una regolare fonte di energia rinnovabile disponibile 24 ore al giorno. Grazie a sistemi più o meno complessi, permette di utilizzare l'energia immagazzinata nel sottosuolo per produrre calore e freddo e, nel caso della geotermia profonda, anche elettricità. L'associazione è particolarmente interessata alla geotermia di superficie, che utilizza l'energia immagazzinata nel sottosuolo o nell'acqua di falda.

Una pompa di calore è utilizzata per estrarre l'energia. Il refrigerante assorbe energia dal terreno o dall'acqua freatica ed evapora. Viene compresso per mezzo di un compressore che ne aumenta la temperatura e si condensa in un condensatore, rilasciando energia nell'edificio.



Figura 1.1: Schema di un sistema geotermico

Il grande vantaggio di questa tecnologia è la piccola variazione della temperatura del sottosuolo (circa 13 °C), che permette di ottenere SCOPs (seasonal performance coefficient) che vanno da 4 a 5,5 a seconda della tecnologia. Questo significa, per esempio, nel caso di uno SCOP di 5, che per 1 kW di potenza utilizzata, vengono restituiti 5 kW di potenza termica.

L'energia geotermica permette di ridurre l'impatto ambientale, grazie a un'efficienza energetica molto alta. In conclusione, con un investimento iniziale superiore ai sistemi tradizionali come il GAS o una pompa di calore aerotermica, i costi variabili di utilizzo sono molto vantaggiosi. Questa tecnologia permette quindi un notevole risparmio in termini economici a lungo termine.

1.1.3 Obiettivo dello stage

Per essere meglio integrato in un ambiente di lavoro stimolante, ho trascorso la maggior parte del mio stage presso StrateGéo, una società attiva associata a AFPG. L'associazione è molto dinamica, il che ha richiesto grande versatilità ed adattabilità del lavoro svolto. Infatti, alcuni obiettivi sono stati definiti durante lo stage.

Come anticipato nell'introduzione, gli argomenti principali del corso sono stati: il fenomeno delle isole di calore, la regolamentazione ambientale RE2020, i bisogni termici degli edifici e l'analisi del COP di una pompa di calore aerotermica.

Il lavoro, anche se autonomo, è stato caratterizzato da frequenti confronti con il tutor dell'AFPG Xavier Moch e il presidente di StrateGéo Jean-Loup Lacroix, che mi hanno aiutato a definire gli obiettivi durante lo stage.

Capitolo 2

Le isole di calore urbane

Il primo argomento trattato durante lo stage è stato il fenomeno delle isole di calore. L'obiettivo era quello di condurre una ricerca in letteratura per capire il fenomeno e analizzare le diverse strategie di mitigazione.

In questo contesto l'effetto dell'utilizzo di sistemi geotermici sul fenomeno è stato analizzato, per capire se l'uso di questa fonte di energia rinnovabile può mitigare il fenomeno. I punti principali che descrivono il fenomeno, ottenuti dall'analisi delle pubblicazioni scientifiche, sono presentati di seguito.

2.1 Il fenomeno

A livello metropolitano, il surriscaldamento urbano è un fenomeno climatico locale noto come isola di calore urbana (Urban Heat Island, UHI). Il fenomeno è stato studiato e descritto per la prima volta da Luke Howard nel 1810, anche se non ha dato un nome al fenomeno.

In generale, è il fenomeno che porta a temperature medie più alte nelle aree urbane densamente abitate rispetto ai piccoli paesi che circondano le grandi città.

La sua intensità è definita come la differenza tra aree urbane e rurali generalmente in termini di temperatura dell'aria ad un'altezza di 2 m (UHI2m) o di temperatura radiante (UHI). Maggiore è la differenza di temperatura, maggiore è l'UHI.

Le isole di calore sono determinate da una serie di cause che interagiscono tra loro [1], tra cui la cementificazione diffusa, la quota di superfici asfaltate rispetto agli spazi verdi, le emissioni dei veicoli, gli impianti industriali e i sistemi di riscaldamento e condizionamento domestici. Tuttavia, lo sviluppo delle isole di calore è

fortemente legato al clima locale, alle dimensioni, alla densità della popolazione e ad altri fattori che fanno sì che alcune città siano più colpite di altre.

Si tratta di un fenomeno episodico, che si manifesta in larga misura per la combinazione di molti fattori, anche se di solito si verifica in estate, soprattutto nelle ore notturne.

Il fenomeno dell'isola di calore è ancora più preoccupante nel contesto del cambiamento climatico e dell'espansione urbana e demografica.

2.2 Meccanismi di riscaldamento urbano

Analizziamo quindi i principali fattori, tra gli altri, che portano alla formazione del fenomeno.

Il rivestimento del suolo

Le pavimentazioni urbane hanno indirettamente esacerbato il fenomeno dell'isola di calore. Se da un lato sono necessari perché hanno contribuito allo sviluppo delle città, garantendo il comodo movimento di merci e persone, dall'altro hanno sostituito la vegetazione, capace di attenuare naturalmente la temperatura dell'aria. Gli effetti negativi della pavimentazione sulle isole di calore sono molteplici. Tuttavia, i più influenti sono l'assorbimento dell'energia solare durante il giorno e la sostituzione della vegetazione, che è in grado di attuare l'evapotraspirazione.

Una città con molti marciapiedi in cemento e asfalto è probabile che presenti isole di calore, poiché immagazzina gran parte dell'energia solare e la rilascia di notte, il che aumenta la temperatura notturna dell'aria urbana.

I canyon urbani

Il fenomeno dei canyon urbani influenza fortemente il fenomeno. Un canyon urbano è una strada relativamente stretta con edifici alti su entrambi i lati. Il dettaglio geometrico più importante di un canyon urbano è il rapporto tra l'altezza del canyon (H) e la sua larghezza (L), H/L , che è definito come "aspect ratio". Più alto è questo valore, maggiore è l'entità dei canyon urbani.

Il fattore di vista del cielo (SVF) è il rapporto tra la radiazione ricevuta da una superficie piana e quella dell'intero ambiente emisferico che irradia ed è calcolato come la frazione di cielo visibile dal suolo. Per un alto SVF, i canyon urbani si

raffreddano rapidamente mentre con un FVS basso, il canyon può trattenere più calore durante il giorno, creando più rilascio di calore durante la notte.

L'ostruzione del vento

I canyon urbani e gli edifici alti hanno anche un impatto sul vento, riducendone l'intensità. In assenza di vento, lo scambio di calore si riduce notevolmente e viene a mancare una componente che aiuterebbe ad abbassare la temperatura nelle città colpite dal fenomeno dell'isola di calore. Infatti, la presenza di edifici modifica lo strato limite, deviando il flusso.

Le attività umane

In conclusione, uno dei principali meccanismi che causano le isole di calore sono le attività umane, specialmente quelle legate al calore emesso dai mezzi di trasporto e dall'aria condizionata.

In generale, nelle città densamente popolate, la somma dei contributi delle auto e dei condizionatori esterni diventa importante e influenza la formazione delle isole di calore.

2.3 Il contributo della climatizzazione alle isole di calore

L'obiettivo principale di questo lavoro di ricerca è stato quello di capire come il rilascio di aria calda nelle aree urbane a causa dell'aria condizionata possa amplificare il fenomeno delle isole di calore urbane.

Ci sono molti studi sull'argomento e diversi casi di studio sono stati analizzati nel corso della ricerca. Il concetto di base è che per raffreddare una stanza con una pompa di calore aerotermica, è necessario trasportare calore dall'interno all'esterno. Nelle aree ad alta densità, il raffreddamento ad aria con rilascio di calore nell'aria esterna è una soluzione poco efficiente perché contribuisce ad un alto aumento della temperatura esterna creando sacche di UHI.

I quartieri più colpiti sono quelli dove l'aria condizionata è molto sviluppata. Secondo alcuni studi, il raddoppio dell'aria condizionata, combinato con la situazione attuale, dovrebbe provocare un aumento locale della temperatura dovuto all'aria

condizionata in alcune zone fino a 2,5°C.

L'aria condizionata è un parametro chiave per i problemi di salute durante le ondate di calore perché, da un lato, riduce la mortalità ma, dall'altro, può aumentare la temperatura delle strade e quindi la domanda di raffreddamento.

Infatti, nelle città densamente popolate, il condizionamento con pompa di calore ad aria può provocare il ciclo vizioso mostrato nella figura 2.1.

A causa delle temperature molto alte, la domanda di raffreddamento aumenta e quindi l'uso di sistemi di raffreddamento, che indirettamente aumenta la temperatura esterna, e il ciclo si ripete.

Alcuni autori hanno sviluppato modelli numerici per capire l'influenza dell'aria condizionata sulla temperatura dell'aria esterna. I risultati di alcuni studi mostrano che la gestione e il tipo di impianto di condizionamento giocano un ruolo importante nell'amplificazione delle isole di calore.

Lo studio condotto da Brice Tremeac et al. [2] è stato di particolare interesse per la ricerca, in quanto analizza diversi scenari per la gestione dell'aria condizionata a Parigi, quantificando gli effetti negativi e positivi per diverse strategie.

2.3.1 Effetto della climatizzazione sull'isola di calore di Parigi

L'effetto dell'aria condizionata sull'isola di calore di Parigi è stato analizzato nell'articolo "Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures" [2]. Sono stati esaminati cinque scenari: il primo rappresenta una situazione di riferimento ipotetica senza aria condizionata (scenario NO-AC); il secondo considera la situazione attuale che include condizionatori individuali ad aria secca, torri di raffreddamento e una rete di raffreddamento urbana. Un terzo scenario presuppone che tutto il calore sia rilasciato come calore sensibile nell'atmosfera (scenario DRY AC). Altri due scenari (4-5) corrispondono a una prospettiva in cui l'aria condizionata è raddoppiata. Lo scenario 4 presuppone che tutto il calore sia rilasciato come calore sensibile nell'atmosfera (scenario DRY ACx2). Al contrario, lo Scenario 5 presuppone che tutto il calore venga rilasciato

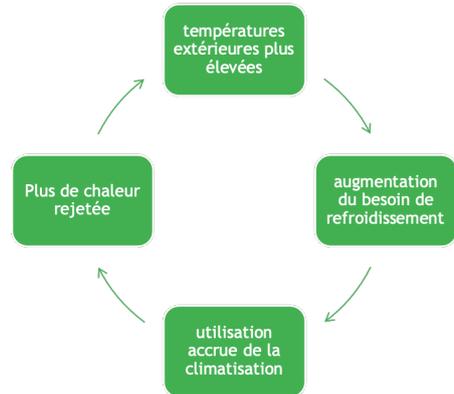


Figura 2.1: Ciclo vizioso

sottoterra o nella Senna (scenario NO RELEASE). Il clima di riferimento è quello registrato durante l'ondata di calore del 2003, che ha causato circa 15.000 morti solo in Francia [3].

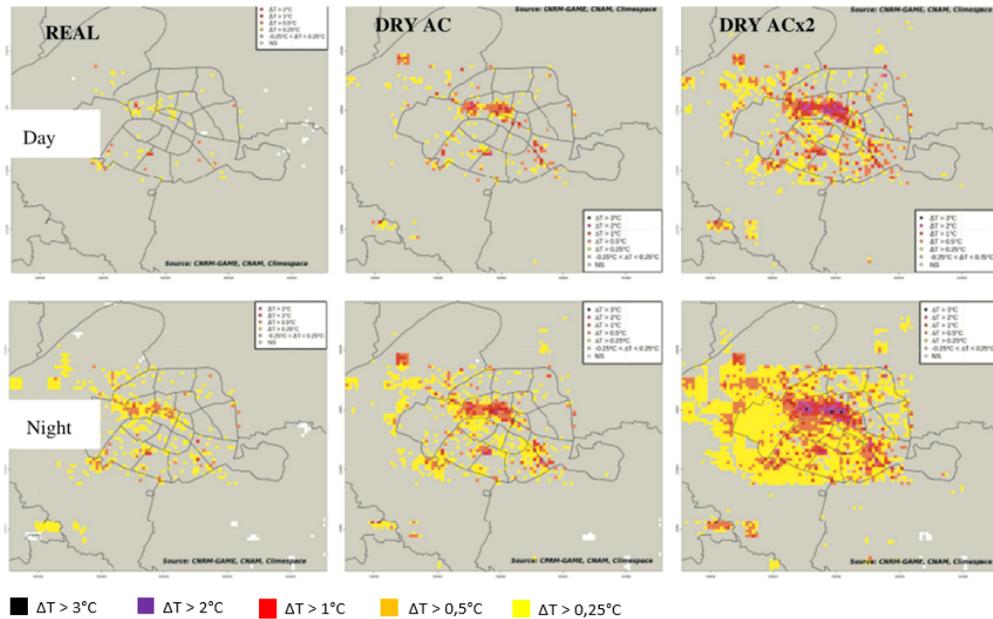


Figura 2.2: L'isola di calore a Parigi secondo i diversi scenari

La figura 2.2 mostra le variazioni di temperatura dal caso NO-AC. Come si può vedere, l'influenza dell'aria condizionata sul fenomeno dell'isola di calore è importante. La simulazione DRY AC X 2, che rappresenta il caso in cui l'uso dell'aria condizionata è raddoppiato, è di grande interesse, infatti può rappresentare lo scenario futuro, considerando la crescita dell'uso dell'aria condizionata negli ultimi anni.

I risultati dello studio mostrano che per il raffreddamento è necessario adottare soluzioni che sfruttino la freschezza del sottosuolo. A differenza di una pompa di calore convenzionale che rigetta l'aria calda negli spazi esterni, queste soluzioni permettono di immagazzinare il calore estivo nel terreno senza aggravare l'UHI.

Nell'analisi fatta sulla città di Parigi, viene simulato lo scenario in cui tutto il calore prodotto dall'aria condizionata viene rilasciato nel sottosuolo o nella Senna in un periodo di onda di calore simile a quello del 2003. Il risultato è che questa configurazione annulla l'aumento di temperatura. Come si può vedere nel caso NO RELEASE, usare il sottosuolo per immagazzinare calore non solo permette di non rilasciarlo nella città, ma fornisce anche un beneficio riducendo sensibilmente la temperatura. I risultati dello studio sono presentati nella figura 2.3.

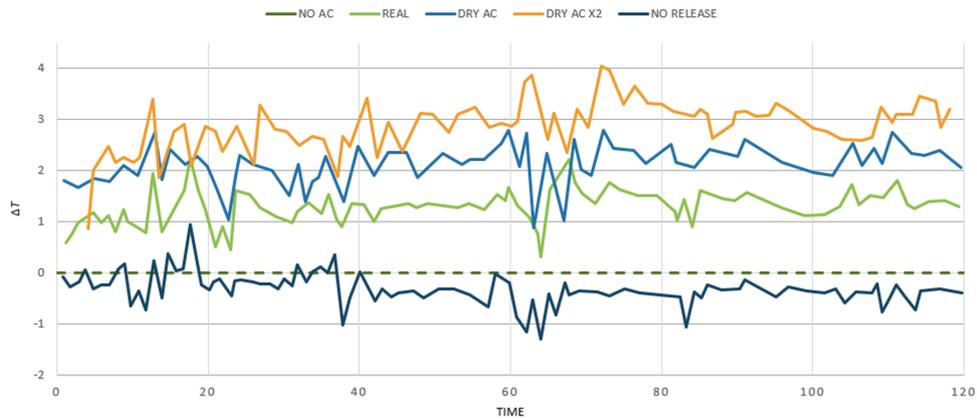


Figura 2.3: Variazione della temperatura nei diversi scenari nel periodo dell'onda di calore del 2003, per un quartiere di Parigi.

Il grafico rappresenta i cinque scenari analizzati. Le curve sono espresse come variazione di temperatura rispetto al caso in cui non vengano utilizzati in alcun modo sistemi di raffreddamento

2.3.2 Fattori che possono incidere sulle isole di calore in futuro

Le isole di calore sono particolarmente preoccupanti nel contesto attuale. In effetti, ci sono alcuni fattori che potrebbero peggiorare la situazione nei prossimi anni. Questi includono il cambiamento climatico, la crescita della popolazione e l'aumento dell'uso dell'aria condizionata.

Una delle conseguenze più note del cambiamento climatico è l'aumento della temperatura media. Le isole di calore urbano forniscono una componente additiva all'aumento della temperatura nelle aree urbane. Più alta è la temperatura di partenza, più pronunciati sono gli effetti dell'UHI. Rispetto al clima futuro secondo Météo France [4], nella Francia metropolitana nei prossimi anni (2021-2050) ci sarà un aumento delle temperature medie tra 0,6 e 1,3°C (più alto nel sud-est in estate), un aumento del numero di giorni di onde di calore in estate, in particolare nelle regioni a sud-est e una diminuzione del numero di giorni anormalmente freddi in inverno in tutta la Francia metropolitana, in particolare nelle regioni a nord-est.

Secondo l'IEA (International Energy Agency) [5], l'aria condizionata rappresenta il consumo di energia in più rapida crescita negli edifici, sia nelle economie emergenti calde e umide dove i redditi stanno aumentando, sia nelle economie industrializzate avanzate dove le aspettative dei consumatori per il comfort termico continuano

a crescere. L'uso di energia per l'aria condizionata negli edifici residenziali e commerciali è più che triplicato in tutto il mondo tra il 1990 e il 2016, come mostrato nella figura 2.4. Con l'aumento dell'uso del raffreddamento a pompa di calore aerotermica, l'effetto negativo sulle UHI diventa più significativo.

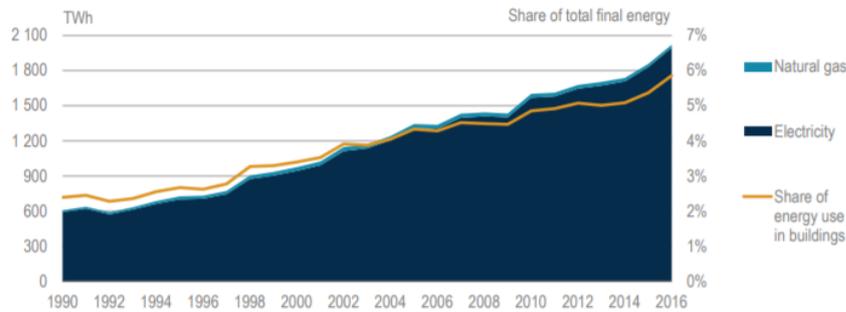


Figura 2.4: Consumo di energia per il raffreddamento degli edifici

Per quanto riguarda la crescita della popolazione, secondo i rapporti delle Nazioni Unite, circa il 54% della popolazione mondiale risiede nelle aree urbane, rispetto al 3% del 1950. Le proiezioni attuali mostrano che l'urbanizzazione potrebbe raggiungere il 66% entro il 2050. La densità della popolazione urbana è anche una causa delle isole di calore.

Da queste considerazioni risulta chiaro che questo fenomeno risulterà particolarmente dannoso in futuro. È quindi necessario anticipare e adottare soluzioni che possano ridurre le conseguenze.

2.3.3 L'effetto delle isole di calore sulla domanda energetica

L'aumento della popolazione che vive nelle città e l'uso dell'aria condizionata portano ad un aumento della domanda di energia per l'aria condizionata e di conseguenza le reti di distribuzione della corrente a volte hanno difficoltà a far fronte all'aumento della domanda di elettricità, soprattutto durante le ondate di calore estive e quindi a fronte di picchi della domanda molto elevati. C'è uno studio [6] che stima l'effetto dell'isola di calore di Atene sul consumo annuale e di punta di energia per il raffreddamento. La base per questa stima è il carico termico previsto in diverse zone di Atene per certi tipi di case durante i mesi della stagione di raffreddamento, cioè da maggio a settembre. Queste aree sono Ilioupolis, un sobborgo di Atene sul bordo dell'isola di calore, e la zona occidentale della Grande Atene, i cui sobborghi sono a distanze variabili dal centro dell'isola di calore.

Questo studio conferma, sulla base dei dati orari della temperatura, il forte aumento della domanda di energia per il raffreddamento e della domanda di picco dovuta all'effetto dell'isola di calore, che è stato dimostrato essere fino al 100%. Questo studio sottolinea ancora una volta la necessità di ridurre l'energia di raffreddamento con mezzi naturali, soprattutto nei paesi con estati calde e alta urbanizzazione come i paesi del Mediterraneo.

Secondo l'Agenzia internazionale dell'energia, la domanda di raffreddamento tipicamente aumenta di molto durante un'ondata di calore, ponendo maggiori richieste al sistema elettrico, la cui affidabilità può essere ulteriormente compromessa da apparecchiature calde che aumentano il rischio di guasti. Per esempio, l'efficienza dei pannelli solari e delle turbine a gas può diminuire a temperature ambientali molto alte. Anche le reti elettriche possono essere colpite, poiché l'alta domanda e le alte temperature riscaldano le linee elettriche, influenzando le loro prestazioni. Anche nelle regioni in cui la domanda di aria condizionata è ora meno diffusa, come gran parte dell'Europa occidentale, le ondate di calore possono aumentare significativamente la domanda di elettricità. In Francia, per esempio, l'ondata di calore dell'agosto 2003, che ha portato le temperature a circa 40°C nella maggior parte del paese, ha aumentato il fabbisogno di elettricità di circa 4.000 megawatt (MW), o circa il 10 per cento, rispetto alla normale domanda di picco estiva. I profili di carico elettrico medio giornaliero per l'inverno e l'estate in California nel 2017 sono mostrati come esempi.

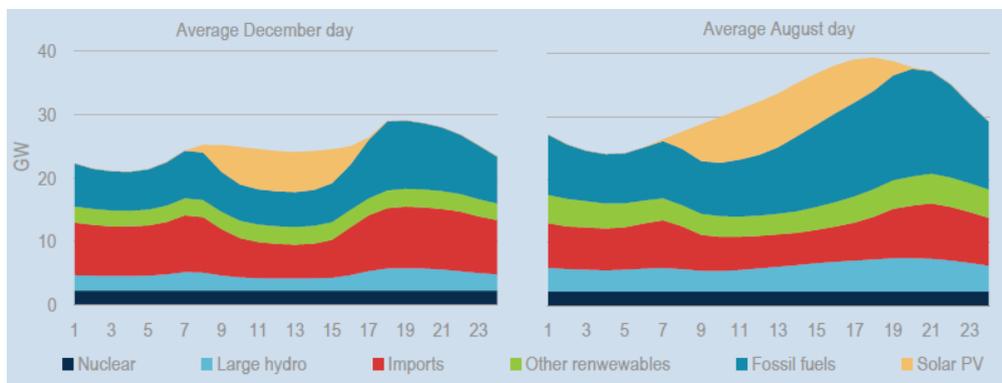


Figura 2.5: Profili di domanda di elettricità medi in inverno ed estate in California

I carichi di condizionamento dell'aria in estate comportano la necessità di una capacità aggiuntiva di generazione di energia, specialmente di centrali a gas, rispetto all'inverno. È costoso far fronte ai picchi di consumo di elettricità. Questo richiede alla rete elettrica di installare e mantenere grandi capacità che possono essere utilizzate solo per poche ore o giorni ogni anno.

2.3.4 Confronto tra un sistema di raffreddamento convenzionale e un sistema a pompa di calore geotermica

L'articolo "Global and local environmental and energy advantages of a geothermal heat pump interacting with a low temperature thermal micro grid" [7] mostra il diverso contributo alle isole di calore generato da due diversi sistemi di raffreddamento. I due sistemi confrontati nell'articolo sono una pompa di calore geotermica e un sistema tradizionale installato in ogni abitazione e comprendente una pompa di calore idrotermica per il raffreddamento. Questi sistemi sono impiegati per raffreddare un condominio a Napoli.

In questo articolo gli autori identificano come possibile soluzione per mitigare gli effetti dell'UHI il sistema di condizionamento dell'aria che interagisce con il suolo, quindi il sistema geotermico.

Tabella 2.1: Confronto tra gli effetti conseguenti all'applicazione di due diverse tecnologie per il raffreddamento: una pompa di calore geotermica e una pompa di calore idrotermica

risparmio di energia	11 %
flusso di calore evitato	86 kW
riduzione delle emissioni di CO ₂	-3,5%
incremento di temperatura evitato	~2 K

Il fattore più importante nel confronto è che la pompa di calore geotermica non fornisce calore scaricato nell'aria urbana. Considerando il calore rigettato nell'ambiente da ogni edificio raffreddato da una pompa di calore idrotermica in una griglia urbana 250 m x 250 m, con una percentuale dell'area urbana occupata da edifici con lo stesso calore rigettato dall'edificio in analisi pari all'80%, si ottiene un valore massimo di aumento della temperatura locale di 2,4 K.

2.3.5 Interazione tra le isole di calore e le onde di calore

Un altro fattore di particolare preoccupazione nello scenario futuro sono le ondate di calore. Sempre in base all'analisi effettuata da Météo France [4], sembra che le ondate di calore, se non ci sarà un cambiamento importante nelle politiche ambientali, aumenteranno sia nella durata che nella frequenza, rendendo ordinari

eventi straordinari come l'ondata di calore del 2003. Il grafico con le stime di Météo France è mostrato nella figura 2.6.

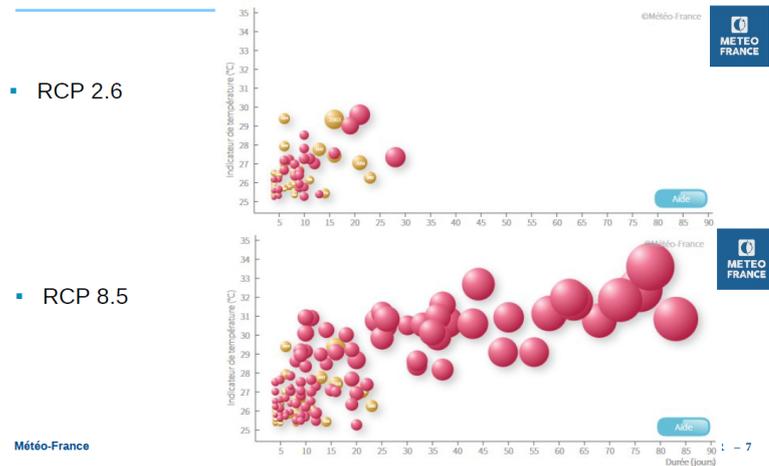


Figura 2.6: Le previsioni di Meteo France sulle future onde di calore

Da questo punto di vista, è interessante capire come le isole di calore interagiscano con le ondate di calore.

Secondo lo studio "Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts" [8], le ondate di calore non solo aumentano l'entità assoluta delle temperature urbane e rurali, ma interagiscono sinergicamente con le isole di calore intensificando la differenza tra le temperature urbane e rurali, con conseguenze peggiori nelle città.

Le temperature notturne sono più influenzate dall'interazione dei due fenomeni, con ripercussioni anche nei periodi successivi all'ondata di calore.

La figura 2.7 mostra la differenza tra le temperature dell'aria urbana e rurale per il giorno e la notte durante un'ondata di calore a Baltimora. In primo luogo, si può vedere che l'effetto isola di calore è più pronunciato di notte. Quando inizia l'ondata di calore, l'ampiezza dei due effetti è coerente e si nota un aumento per entrambi i fattori. Tuttavia, una volta che l'ondata di calore è finita, l'aumento dell'intensità dell'isola di calore persiste ancora per qualche giorno.

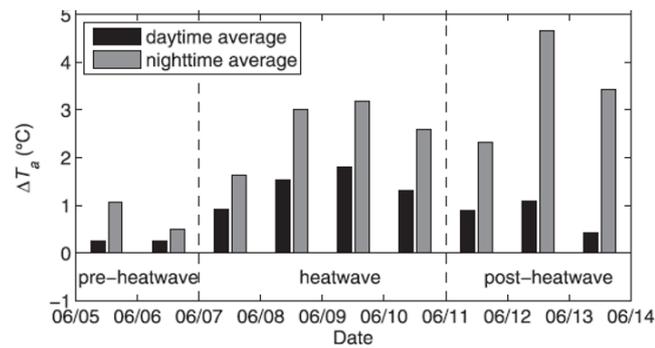


Figura 2.7: Confronto tra le temperature medie e quelle durante l'ondata di calore

2.3.6 Conclusione

Le isole di calore urbane sono un fenomeno complesso che si verifica a causa di una combinazione di molti fattori, tra i quali il meteo e l'attività umana giocano un ruolo particolare. Anche se oggi gli effetti negativi dell'UHI si verificano per periodi di tempo limitati e con effetti non troppo gravi, sulla base del crescente uso di aria condizionata con pompe di calore aerotermiche e degli scenari futuri riportati da Météo France, è importante porre la questione al centro dello sviluppo urbano. Tra le soluzioni che possono essere adottate per mitigare l'effetto delle UHI, ci sono scelte che devono essere fatte dalle amministrazioni cittadine, come l'aumento della vegetazione nei centri urbani. Tuttavia, una componente importante del contributo antropogenico alle isole di calore è dovuta al rilascio di aria calda nelle città. Per questo motivo, l'energia geotermica può giocare un ruolo importante nella crescente domanda di raffreddamento negli edifici. Rilasciando il calore nel sottosuolo, l'energia geotermica evita di contribuire all'aumento della temperatura delle città.

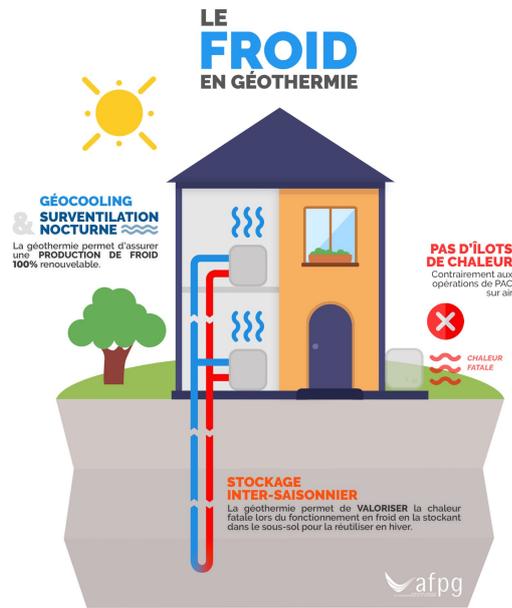


Figura 2.8: Geocooling

Il geocooling è la modalità di raffrescamento gratuito che utilizza il terreno come pozzo termico ed è particolarmente interessante in questo contesto. Il principio del "geocooling" consiste nel far circolare, attraverso uno scambiatore di calore, il fluido termovettore che proviene dal sistema geotermico direttamente nella rete dell'edificio. La pompa di calore viene quindi bypassata e quindi l'unica causa di consumo elettrico sono le pompe di circolazione del fluido termovettore. Con questa soluzione si può rinfrescare gli edifici senza rilasciare calore nell'aria esterna.

Capitolo 3

RE2020

Come specificato dal Ministero della Transizione Ecologica [9], a partire dal 1° gennaio 2021, entrerà in vigore il nuovo regolamento ambientale per gli edifici, RE2020, che sostituirà l'attuale regolamento, RT2012. Uno dei principali obiettivi è agire sulle emissioni degli edifici, sia nel settore residenziale che in quello terziario, che rappresentano un quarto delle emissioni nazionali di gas serra.

I temi principali sono i seguenti:

- Ridurre l'impatto climatico dei nuovi edifici prendendo in considerazione tutte le emissioni durante il ciclo di vita a partire dalla costruzione.
- Continuare a migliorare il rendimento energetico e ridurre il consumo dei nuovi edifici.
- Garantire agli abitanti che la loro abitazione sarà adatta alle condizioni climatiche future introducendo un obiettivo di comfort in estate.

Come parte dello sviluppo della RE2020, l'amministrazione ha effettuato simulazioni in collaborazione con il CSTB e il CEREMA, al fine di definire i requisiti della futura regolamentazione.

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando uno strumento di calcolo appositamente sviluppato dal CSTB. A certe condizioni, l'amministrazione ha messo lo strumento di calcolo a disposizione delle imprese per realizzare delle simulazioni in parallelo al fine di contribuire allo sviluppo della regolamentazione. L'AFPG

ha richiesto l'uso di questo software per capire, attraverso lo sviluppo di alcune simulazioni, come l'energia geotermica viene presa in considerazione nella futura RE2020. Va sottolineato che l'obiettivo di questa parte dello stage era quello di verificare se e come l'energia geotermica è stata implementata nel motore di calcolo e di conseguenza nella futura regolamentazione. Ci siamo quindi limitati a considerare le componenti inerenti all'energia geotermica e i risultati che produce, senza cambiare il modello dell'edificio utilizzato.

Il software si basa su un documento denominato "metodo di calcolo" pubblicato dall'amministrazione, che dà i seguenti coefficienti come risultato delle simulazioni:

- Il **coefficiente Bbio** espresso in punti caratterizza l'efficienza energetica dell'edificio e permette di valutarla in relazione al riscaldamento, al raffreddamento e al futuro consumo di illuminazione artificiale. Si basa sulla considerazione dei seguenti elementi: il progetto architettonico dell'edificio; le caratteristiche dell'involucro in termini di isolamento, trasmissione solare, trasmissione luminosa, apertura delle finestre e tenuta all'aria; le caratteristiche di inerzia termica dell'edificio.
- Il coefficiente **Cep** espresso in kWh/(m².SREF) di energia primaria rappresenta il consumo di energia per il riscaldamento, raffreddamento, acqua calda sanitaria, ausiliari e illuminazione negli edifici. Questo coefficiente Cep aggiunge al coefficiente Bbio l'impatto dei seguenti sistemi energetici: sistemi di riscaldamento e raffreddamento compresi gli ausiliari; sistemi di acqua calda sanitaria compresi gli ausiliari; ausiliari di ventilazione; sistemi di illuminazione; sistemi di produzione locale di energia.
- L'indicatore dei gradi-ora **DH** valuta il malessere dell'occupante (temperatura operativa al di sopra della temperatura di comfort adattiva). L'indicatore DH è calcolato solo se l'unità non è climatizzata, altrimenti si presume che il sistema di raffreddamento attivo installato sia in grado di garantire il comfort.

3.1 Il motore di calcolo

Il motore di calcolo è sviluppato dal CSTB per conto del ministero della transizione ecologica al fine di definire i valori di riferimento dei coefficienti BBio, Cep e Dh. Il motore di calcolo è in costante aggiornamento perché è in fase di sviluppo e contiene quindi molti errori. Il software Maestro permette l'implementazione di diverse versioni del motore di calcolo. Dopo aver installato l'ultima versione pubblicata dall'amministrazione, possiamo lanciare Maestro. Trovate qui sotto l'interfaccia grafica del programma.

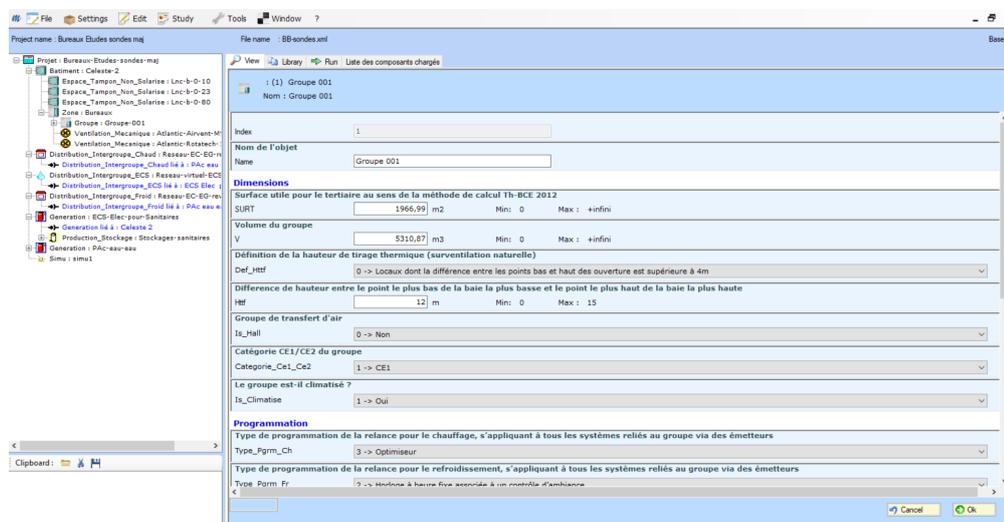


Figura 3.1: Maestro

I componenti principali dell'ambiente di simulazione sono: la definizione dell'edificio, i sistemi di generazione e distribuzione di riscaldamento, raffreddamento e acqua calda sanitaria e le caratteristiche della simulazione.

- Lo schema di definizione degli edifici non è riportato perché sono stati utilizzati modelli già sviluppati. Tuttavia, per scopi informativi, il modello di un edificio ha quattro suddivisioni principali, il livello "Building", il livello "Zone", il livello "Group" e il livello "Local".
- I sistemi di riscaldamento e raffreddamento sono composti da: emettitori di calore o di freddo, situati al livello del gruppo; reti di distribuzione di gruppo e intergruppo, che generano perdite e trasmettono l'informazione energetica

richiesta ai generatori; generatori di calore o di freddo, organizzati come un gruppo di generazione.

L'edificio

Per le simulazioni sono stati utilizzati due progetti di edificio già sviluppati da un'altra azienda, uno riguardante un ufficio e l'altro un condominio. I due edifici implementati nel motore di calcolo sono progetti reali e sono riservati, quindi non è possibile descriverli in questo rapporto. Tuttavia, le caratteristiche principali dei due edifici sono riassunte nella seguente tabella.

Tabella 3.1: Edifici impiegati per le simulazioni

Tipologia	Ufficio	Condominio
Superficie	1967	1361
Volume	5311	3539
Dipartimento	77	75

3.2 L'energia geotermica nel motore di calcolo

Il primo obiettivo era verificare se l'energia geotermica fosse presente nel motore di calcolo nelle sue diverse applicazioni: riscaldamento, raffreddamento attivo, produzione di acqua calda sanitaria e raffreddamento passivo con geocooling. Per definire un generatore per il riscaldamento, raffreddamento o acqua calda sanitaria nel motore di calcolo, si deve definire un generatore che deve essere specificato a livello dell'edificio, basta cliccare con il tasto destro del mouse sul nodo "bâtiment" e aggiungere una "génération".

Una volta definite le caratteristiche della generazione, bisogna specificare il tipo di sistema che si vuole utilizzare. I sistemi geotermici attivi, alimentati da una pompa di calore, rientrano nella categoria dei "generatori termodinamici elettrici". Il geocooling, d'altra parte, è un caso a parte, che sarà trattato nella sezione appropriata. I generatori termodinamici possono essere a servizio singolo (riscaldamento, raffreddamento o ACS), doppio servizio (riscaldamento e ACS), invertibili (riscaldamento e raffreddamento) o triplo servizio (riscaldamento, raffreddamento e ACS).

Per definire un sistema geotermico, è necessario determinare la sorgente a monte da utilizzare e tra le diverse opzioni con fluido acqua, quelle di interesse sono :

- Captazione
- Acqua di falda con scambiatore di separazione
- Acqua di falda senza scambiatore

A tale scopo, basta cliccare con il tasto destro del mouse sul generatore definito e aggiungere la sorgente a monte desiderata con le sue caratteristiche. Nella figura 3.2 potete vedere la scheda per la definizione della sorgente a monte.

Index	142		
Nom de l'objet	RT_Data_Source_Amont		
Name	RT_Data_Source_Amont		
Identificateur du fluide amont Eau(1) Air (2) Sol(3)			
Id_Fl_Amont	1 -> Eau		
Type de source amont eau du générateur	1 -> Captage		
Source_Amont_Eau	1 -> Captage		
Type de gestion des auxiliaires de captage			
Idgestion_Captage	1 -> Marche permanente au cours de la saison de fonctionnement		
Type de gestion des pompes de captage			
Idgestion_Pompe_Captag	1 -> Fonctionnement tout ou rien		
Ecart de température aux bornes de l'évaporateur en mode chauffage			
Delta_Theta_Evap_Ch	5 °C	Min: -infini	Max: +infini
Ecart de température aux bornes du condenseur en mode refroidissement			
Delta_Theta_Cond_Fr	5 °C	Min: -infini	Max: +infini
Puissance électrique des pompes de captage			
Ppompes_Cap	0 W	Min: 0	Max: +infini
N° du mois durant lequel la température d'eau de captage est la plus faible			
Idmois_Mini	1 -	Min: 1	Max: 12
Température minimale annuelle d'eau de captage			
Theta_Min_Source	0 °C	Min: -infini	Max: +infini
Température maximale annuelle d'eau de captage			
Theta_Max_Source	0 °C	Min: -infini	Max: +infini
Résistance thermique entre le fluide dans la sonde et le sol			

Figura 3.2: Definizione della sorgente a monte

3.2.1 Geotermia attiva

Obiettivo di questa parte dello stage è stata verificare la corretta implementazione della geotermia nel motore di calcolo. Per quanto riguarda la geotermia "attiva", cioè che utilizza una pompa di calore a compressione, tutte le opzioni per la geotermia nel metodo di calcolo pubblicato dall'amministrazione erano presenti anche nel motore di calcolo. Dopo aver definito la sorgente a monte, è possibile selezionare un generatore geotermico tra le seguenti opzioni:

- Generatore termodinamico non invertibile per il riscaldamento o il raffreddamento

- Generatore termodinamico invertibile per il riscaldamento o il raffreddamento
- Generatore termodinamico per la produzione di acqua calda sanitaria
- Generatore termodinamico doppio servizio riscaldamento e ACS
- Generatore termodinamico triplo servizio per riscaldamento, raffreddamento e ACS

Una volta selezionato il generatore desiderato, si possono inserire tutti i parametri corrispondenti. Nelle simulazioni effettuate, si è sempre scelto di mantenere, per quanto possibile, le impostazioni predefinite. Nel caso in cui il generatore produca acqua calda sanitaria, deve necessariamente essere associato a un gruppo di produzione-stoccaggio.

3.2.2 Geocooling

Durante il processo di verifica della presenza di sistemi geotermici, è stata notata l'assenza dell'opzione del geocooling, sebbene fosse ben descritta nel metodo di calcolo. In una prima fase, non è stato quindi possibile effettuare simulazioni con questo sistema di raffreddamento. Poi, nell'aggiornamento di novembre, è stato implementato il modulo di geocooling. La caratterizzazione del geocooling dipende dal tipo di edificio, in particolare se è climatizzato o meno. Se il gruppo è climatizzato, il geocooling funziona come contributo a un sistema di raffreddamento attivo in due modi diversi.

- 1° caso "base + supplemento": il geocooling raffredda parzialmente l'acqua di qualche grado, e si aggiunge un generatore di raffreddamento attivo per portarla alla temperatura di partenza desiderata.
- 2° caso "alternato": il geocooling viene utilizzato quando la sua potenza è sufficiente per raffreddare l'edificio. Se la domanda di raffreddamento supera quella che può essere fornita dal geocooling, viene utilizzato il sistema di raffreddamento attivo. Questo presuppone che il sistema di raffreddamento attivo possa coprire da solo i requisiti di raffreddamento dell'edificio. Questo tipo di combinazione dovrebbe essere usata quando il generatore di raffreddamento supplementare è un generatore termodinamico che condivide la stessa sorgente del geocooling.

Se l'unità non è climatizzata, l'implementazione del geocooling è diversa ed è caratterizzata da due sottoinsiemi:

- uno o più componenti che descrivono gli emettitori del sistema di geocooling nei diversi gruppi, così come la parte terminale della rete di distribuzione dell'acqua refrigerata.
- un componente che descrive la distribuzione intergruppo e lo scambiatore di separazione tra l'acqua refrigerata dell'edificio e l'acqua della sorgente geotermica a monte.

3.2.3 Considerazioni

Le principali considerazioni sul motore di calcolo sono l'invarianza dell'indicatore DH in presenza del sistema di geocooling passivo e l'impostazione predefinita degli ausiliari nei sistemi di generazione geotermica. Il geocooling è una delle caratteristiche più interessanti dell'energia geotermica perché permette il raffreddamento senza l'uso di una pompa di calore. Tuttavia, diverse simulazioni sono state effettuate per verificare l'impatto del geocooling sul comfort estivo, ma il valore DH che rappresenta il numero di ore di disagio estivo non varia. Questo è un problema perché, secondo i risultati della simulazione, la scelta di implementare un sistema di geocooling non ha alcun effetto sulla riduzione del disagio estivo. Per verificare se fosse solo un problema relativo al geocooling, è stato imposto un componente che simula la ventilazione dovuta all'apertura delle finestre per un'unità non climatizzata. Tuttavia, anche in questo caso, il valore dell'indicatore DH non cambia.

Si conclude quindi che al 11/12/2020, il motore di calcolo presenta un problema relativo alla riduzione del disagio estivo in unità non climatizzate attraverso soluzioni di raffreddamento passivo.

Un altro problema riscontrato nel motore di calcolo riguarda la configurazione predefinita degli ausiliari. Nella definizione della sorgente a monte, ci sono due parametri relativi alla gestione degli ausiliari. Il primo è "Idgestion_Captage", che definisce il tipo di gestione degli ausiliari durante il periodo di utilizzo del generatore. Possiamo avere :

- 1- Funzionamento permanente durante la stagione di funzionamento
- 2- Funzionamento tutto o niente a seconda della domanda di energia

Solo se "Idgestion_Captage" è "Tutto o niente in funzione della domanda di energia", possiamo definire un secondo parametro: "Idgestion_Pompe_Captage", che definisce la gestione delle pompe secondo la domanda del generatore. Le opzioni per questo secondo parametro sono le seguenti:

- 1-Funzionamento con regolazione tutto o niente
- 2-Funzionamento con regolazione modulante a velocità variabile del compressore

Sfortunatamente, l'ordine delle scelte è invertito anche per il secondo parametro, poiché il software seleziona automaticamente "Funzionamento tutto o niente" per default.

Sarebbe quindi consigliabile chiedere l'inversione dell'ordine di scelta sia per "Idgestion_Captage" che per "Idgestion_Pompe_Captage" e ottenere la seguente configurazione di default:

- "Idgestion_Captage" = "Tutto o niente secondo la domanda di energia"
- "Idgestion_Pompe_Captage" = "Funzionamento con regolazione modulante a velocità variabile del compressore".

Ciò significa che gli ausiliari funzionano solo quando la pompa di calore e il sistema lo richiedono.

Capitolo 4

Simulazioni termiche con TRNSYS

La parte più importante dello stage è stata la definizione di un metodo per calcolare il fabbisogno termico di diversi edifici e valutare l'impatto della modalità di avvio del sistema di riscaldamento in termini di potenza massima richiesta e di energia consumata. A questo proposito, l'associazione ha acquistato il software TRNSYS. Per completare il programma, sono state acquistate delle librerie (librerie TESS) per accelerare il lavoro di simulazione. In particolare, la libreria TESS "Loads and Structures" contiene alcuni edifici standard di diversi tipi. Nonostante la presenza di alcuni edifici predefiniti, l'uso diretto nell'ambiente di simulazione era estremamente laborioso. Si è quindi deciso di modellare l'edificio in modo completamente indipendente. Anche se l'obiettivo iniziale era quello di ripetere la stessa procedura per diversi tipi di edifici, solo un'analisi per un edificio di tipo ufficio è stata possibile a causa dei vincoli di tempo.

Il software TRNSYS

TRNSYS è un ambiente di simulazione completo ed estensibile per la simulazione in regime dinamico di sistemi, compresi gli edifici multizona. È usato da ingegneri e ricercatori per modellare nuovi concetti energetici, che vanno dai semplici sistemi di acqua calda sanitaria alla progettazione e alla simulazione di edifici e delle loro attrezzature, compresi i sistemi di regolazione e il comportamento degli occupanti. Uno dei fattori chiave di TRNSYS è la sua struttura modulare, che permette

di creare associazioni tra diversi componenti chiamati "types" per rappresentare sistemi molto complessi. TRNSYS è in realtà un pacchetto di software che include:

- Simulation Studio
- Simulation Engine
- Multi-zone Building Interface (TRNBuild/TRNSYS3d)
- TRNEdit/TRNSED

4.1 Sviluppo del modello dell'edificio

Per effettuare le simulazioni con TRNSYS, è stato necessario innanzitutto modellare l'edificio. L'obiettivo iniziale era quello di fornire simulazioni utili per l'associazione, quindi è stato scelto un ufficio di medie dimensioni, una categoria che si presta all'uso dell'energia geotermica. Di seguito i passaggi dello sviluppo del modello di edificio.

La struttura è molto semplice: ha due zone termiche al piano terra, una zona termica al secondo piano e tre zone termiche al terzo piano. Uno degli obiettivi era quello di definire i carichi termici e la potenza massima richiesta variando la modalità di avvio del riscaldamento. Sono state definite due versioni per lo stesso edificio, rispettivamente con alta e bassa inerzia termica (casi 1 e 2). Inoltre, per ogni caso, i carichi termici sono stati analizzati assumendo spegnimento notturno o attenuazione notturna del riscaldamento (casi a e b). Con attenuazione notturna si intende l'impostazione di un valore di temperatura di setpoint ridotto durante i periodi di non occupazione.

Una tabella riassuntiva dei diversi scenari è riportata di seguito. I valori di riferimento per l'inerzia dell'edificio sono presi dai valori inseribili nel metodo di calcolo della RE2020.

Tabella 4.1: Casi analizzati

	Caso 1a	Caso 1b	Caso 2a	Caso 2b
Inerzia [$kJ/(Km^2)$]	260	260	110	110
Attenuazione notturna	Si	No	Si	No

Tabella 4.2: Casi analizzati

4.1.1 Trnsys 3d

Per ottenere risultati accurati e facili da interpretare, il software TRNSYS fornisce un plug-in chiamato Trnsys3d per Google SketchUp che permette di modellare l'edificio in un ambiente di sviluppo tridimensionale in un formato facilmente esportabile in TRNSYS. Le specifiche dell'edificio saranno definite con precisione in una fase successiva. Il vantaggio di Trnsys3d è che permette di definire rapidamente e facilmente la geometria delle zone termiche.

L'uso di Trnsys3d è particolarmente efficace per gli obiettivi di questo studio perché permette, nelle prime fasi di modellazione, di scegliere un "template" contenente informazioni relative a diversi tipi di edifici (tempo di presenza, tipo di ventilazione, materiali da costruzione, ecc...), che viene associato al modello geometrico.

In questo caso, è stato scelto il modello contenente i valori tipici per un ufficio in Francia. Anche se questa procedura ha semplificato molto la definizione del modello, è stato necessario modificare successivamente diverse caratteristiche per rendere il modello adatto agli obiettivi generali del lavoro.

La figura 4.1 mostra l'edificio modellato in Google SketchUp utilizzato per le simulazioni con TRNSYS.

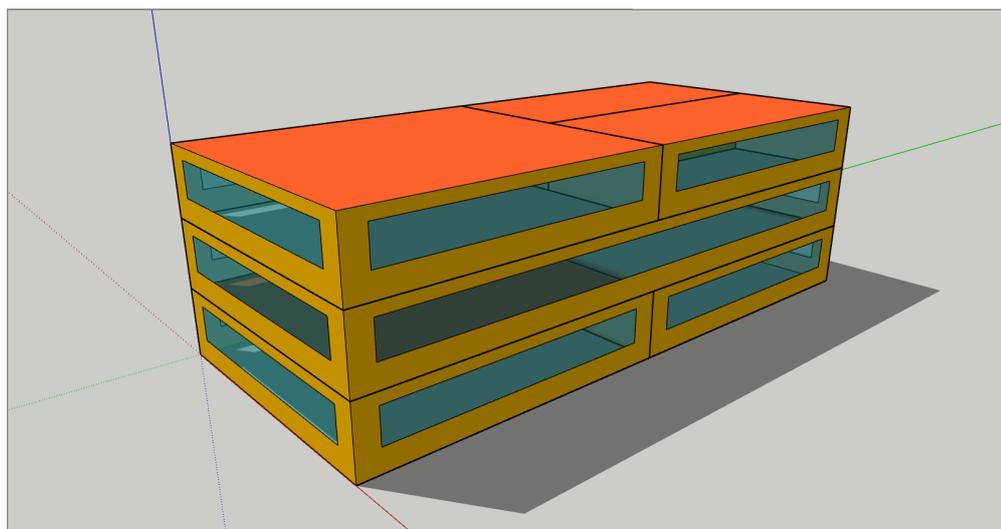


Figura 4.1: Modello 3D dell'edificio

Per quanto riguarda il livello di precisione della rappresentazione dell'edificio, va notato che quella presentata nella figura 4.1 non è una descrizione architettonica dell'edificio, ma una divisione schematica in zone termiche o "airnodes".

Un modello termico non deve necessariamente avere l'aspetto di un modello

architettonico e nella maggior parte dei casi la geometria può essere semplificata. Inoltre, la semplificazione è raccomandata da Trnsys, poiché permette di ridurre notevolmente il tempo di simulazione riducendo in modo trascurabile la precisione dei risultati. Per esempio, in questo caso, la presenza di diverse finestre affiancate è stata rappresentata da un'unica finestra molto grande.

Una volta che tutte le zone termiche sono state aggiunte, è importante definire la relazione che esiste tra loro e il tipo di superfici al contorno. Per farlo si usa il comando "Surface match" che assegna ad ogni superficie il tipo (muro esterno, muro interno, tetto, soffitto...) e la contiguità delle zone confinanti. Anche se questo strumento permette di caratterizzare rapidamente tutte le superfici del modello, è utile controllare che tutte le superfici siano coerenti, per esempio che un muro esterno sia effettivamente definito come tale.

La figura 4.2 mostra la separazione delle zone termiche al terzo piano come esempio.

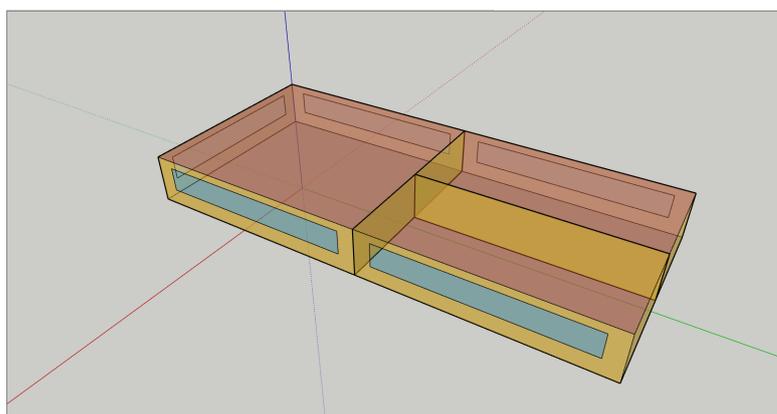


Figura 4.2: Separazione delle zone termiche

Una volta completata la modellazione della separazione delle zone termiche dell'edificio, è possibile salvare il file in un formato che può essere importato direttamente in TRNBuild, grazie al quale avviene l'effettiva definizione dei parametri principali del modello.

4.2 TRNBuild

TRNBuild è il software di TRNSYS dedicato alla definizione del modello termico. Una volta importato il file generato in Trnsys3d, è possibile avere automaticamente nella finestra di TRNBuild Navigator lo schema del modello, nel quale troviamo: i dati del progetto, la definizione delle caratteristiche costruttive, gli orari di presenza, i "regime types" (riscaldamento, condizionamento, ventilazione, infiltrazioni, apporto energetico interno) e la suddivisione delle zone termiche.

La finestra "Project" visualizza i dati principali del progetto. Le finestre "TRNBuild Navigator" e "Project" sono mostrate nella figura 4.3. Per visualizzare più informazioni, basta espandere il nodo interessato. Per esempio, l'estensione di una zona termica ci dà le informazioni pertinenti, che possiamo modificare in una finestra supplementare.

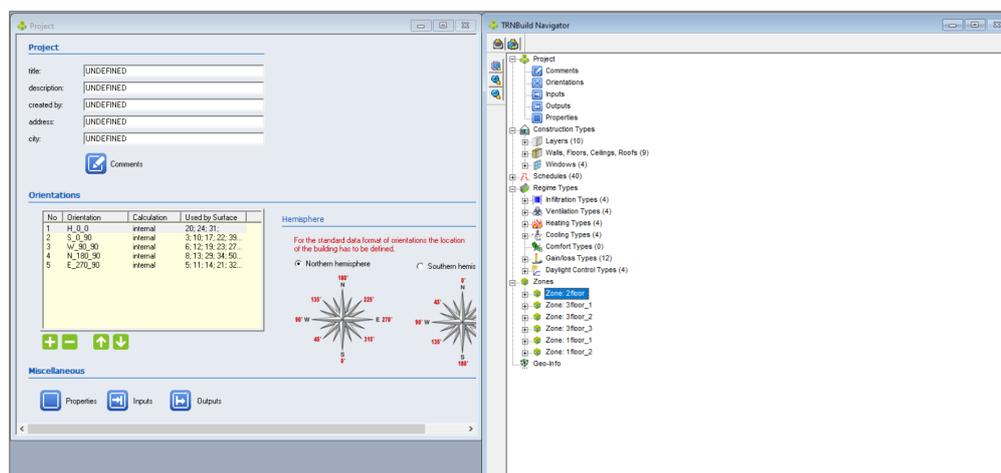


Figura 4.3: TRNBuild Navigator

Tutti i parametri sono stati definiti allo stesso modo per tutte le zone termiche. Tutti i parametri presenti nel modello in TRNBuild Navigator sono specificati nell'ordine seguente.

Construction Types

Come spiegato nel capitolo precedente, durante le prime fasi di sviluppo del modello attraverso il plug-in Trnsys3d, è stato selezionato il template ufficio-Francia che contiene informazioni su questo tipo di edificio. Tra questi c'è la definizione di

stratigrafie, superfici opache e trasparenti. La scelta del modello è perfettamente in linea con gli obiettivi del progetto, perché ha permesso di ottenere molto rapidamente valori medi e generali, ottenuti dall'analisi di molti edifici. TRNBuild assegna poi le caratteristiche corrispondenti alle superfici definite in Trnsys3d.

Per non perdere il carattere generale perseguito nel lavoro, si è scelto di mantenere i valori presenti nella libreria dei modelli. Come esempio, riportiamo la definizione della stratigrafia "Muro esterno" attribuita da TRNBuild che sarà applicata in tutti i muri esterni così definiti in Trnsys3d.

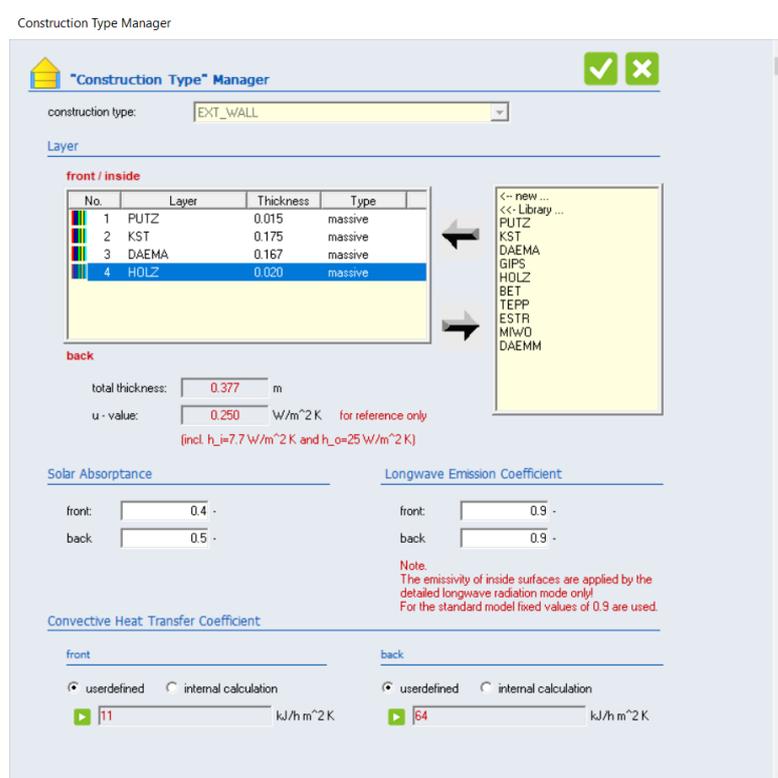


Figura 4.4: External wall

Schedules

Le ore di presenza degli occupanti sono molto importanti nel calcolo del fabbisogno termico di un edificio. La tipologia degli uffici presenta scenari di occupazione molto precisi, ed è quindi necessario adattare il modello allo scopo dell'edificio. Per esempio, dato che i dipendenti degli uffici vengono generalmente al lavoro nelle ore diurne, non è necessario impostare una temperatura di setpoint invernale di

21 gradi di notte. Anche i tempi di occupazione sono stati definiti utilizzando il template office-France, che sono molto dettagliati perché tengono conto anche delle fluttuazioni medie del numero di dipendenti durante il giorno, per esempio, considerando la riduzione del numero di persone presenti durante la pausa pranzo. Ecco lo scenario di occupazione dal lunedì al venerdì come esempio.

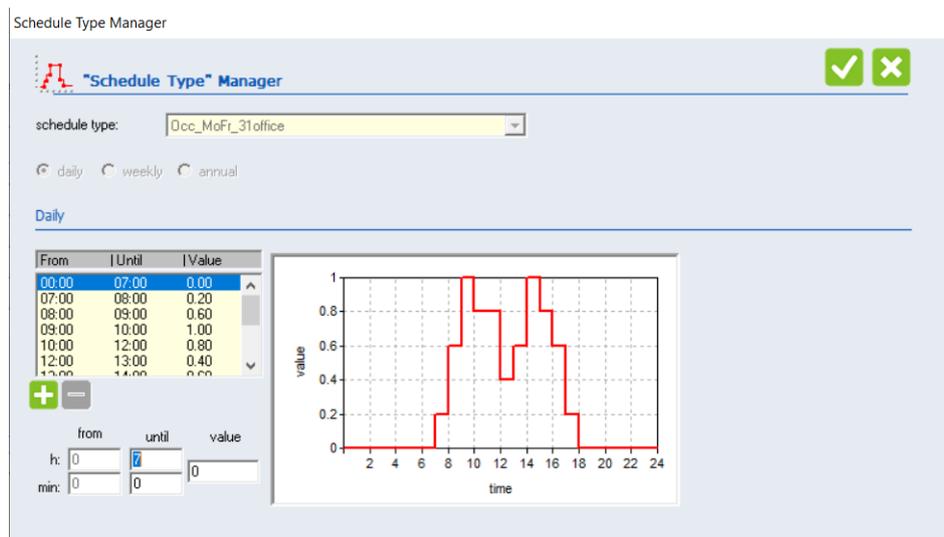


Figura 4.5: Occupazione durante le ore di lavoro

Gli orari implementati nel modello non riguardano solo l'occupazione, ma anche l'uso dei dispositivi elettronici e dell'illuminazione. Infatti, non sono solo utili per determinare i tempi di accensione e spegnimento del riscaldamento/raffreddamento, ma anche per stimare i valori di umidità e gli apporti di energia, che saranno discussi nella sezione "Regime types". Per definire la modalità di accensione del riscaldamento nei casi 1b e 2b, è stato definito una specifica "Schedule", che sarà discussa nella sezione seguente.

Regime Types

Nel nodo "Regime Types", i parametri possono essere definiti a livello dell'edificio e possono poi essere implementati come desiderato nelle singole zone termiche. Questi parametri sono: infiltrazione, ventilazione, riscaldamento, raffreddamento, livello di comfort, input di energia interna e controllo dell'illuminazione.

Infiltrazioni

Per il valore delle infiltrazioni, che rappresentano un flusso d'aria che entra nella zona dall'esterno, si è scelto di utilizzare il valore presente nella libreria del programma, pari a 0,05 ricambi d'aria all'ora.

Ventilazione

Per la ventilazione, TRNBuild permette di rappresentare rapidamente una ventilazione a doppio flusso. A tal fine, è necessario definire i valori della portata d'aria, la temperatura di set-point e l'efficienza dello scambiatore di calore per il recupero di energia.

Inoltre, la ventilazione è attivata solo durante le ore di lavoro. I parametri per definire la ventilazione sono mostrati nella tabella seguente.

Tabella 4.3: Ventilation

Volume flow rate related to reference floor area	0,7	vol/h
Temperatura di Set point durante il periodo di occupazione	21	°C
Sensible heat recovery ratio	0,75	
min humidity	30	%
max humidity	60	%

La temperatura dell'aria T_{HR} dopo lo scambiatore di calore è calcolata con il rendimento dello scambiatore η_{sens} , la temperatura dell'aria di ritorno T_{RA} e la temperatura dell'aria esterna T_{OA} con la seguente equazione :

$$T_{HR} = \eta_{sens}(T_{RA} - T_{OA}) + T_{OA}$$

La potenza per scaldare $\dot{Q}_{ht,sens}$ o raffreddare $\dot{Q}_{cl,sens}$ l'aria per regolare la temperatura di consegna T_{sens} è calcolata con la portata d'aria \dot{m} con le seguenti formule:

$$\dot{Q}_{ht,sens} = \dot{m}cp(T_{set} - T_{HR})$$

$$\dot{Q}_{cl,sens} = \dot{m}cp(T_{HR} - T_{set})$$

Il sistema assicura anche che i livelli di umidità relativa siano mantenuti entro gli estremi selezionati.

Riscaldamento

La definizione delle modalità di riscaldamento è il punto chiave per gli obiettivi del lavoro, poiché permette di calcolare i carichi termici dell'edificio. A differenza di altri parametri, le caratteristiche del riscaldamento variano da caso a caso.

Per i casi 1a e 2a, è stata definita una modalità di riscaldamento per non superare la potenza disponibile. Sarà specificato nella sezione pertinente.

Per i casi 1b e 2b, è stata utilizzata la configurazione standard del modello, che stabilisce semplicemente una temperatura impostata di 21 gradi dalle 7 del mattino alle 18 durante i giorni feriali e una temperatura minima di 15 gradi.

Raffrescamento

Nella sezione "tipo di raffrescamento" di TRNBuild sono stati definiti i parametri per il raffrescamento. A differenza del riscaldamento, gli stessi parametri sono stati utilizzati per i diversi scenari. In particolare, è stata fissata una temperatura di 26 gradi per le ore di lavoro. Infine, è stata definita una temperatura massima di 30 gradi per i periodi non lavorativi, quindi senza occupanti.

Apporti di energia interni

"Gain/losses" è usato per definire i tipi di apporti di energia interna da includere nel modello dell'edificio. Come menzionato sopra, tre tipi di apporti interni sono stati aggiunti al modello: persone, dispositivi elettronici e illuminazione. Le librerie di TRNBuild sono molto dettagliate, ad esempio per i contributi interni dovuti alle persone, la produzione di calore per radiazione e convezione è definita in base al tipo di attività nell'edificio. Per il caso in questione, sono stati presi i valori corrispondenti a persone sedute, essendo quello analizzato un ufficio. Per i valori energetici relativi ai dispositivi elettronici e all'illuminazione, si è preferito

mantenere i valori predefiniti assegnati dal software. I valori utilizzati per il modello sono riportati nella tabella seguente e sono definiti in base alla superficie.

Tabella 4.4: Valori degli apporti di energia interni

	convective $kJ/(hm^2)$	radiative $kJ/(hm^2)$
people	9	9
lights	17	40
electrical equipment	20,1	5,4

Le "Schedules" presenti nel modello giocano un ruolo importante nella definizione dei contributi interni, poiché tutti i contributi energetici sono legati al tempo di presenza.

Zone termiche

Una volta completato il processo di definizione dei "Regime types", è possibile definire le caratteristiche delle zone termiche, compresi i valori descritti sopra.

Tra le prime caratteristiche modificate c'è l'inerzia dell'edificio, rappresentata dalla variabile "capacitance". Per modificare l'inerzia dell'edificio, basta selezionare la zona in TRNBuild Navigator e modificare il campo corrispondente nella finestra che si apre. La finestra corrispondente a una delle zone termiche del terzo piano è mostrata come esempio.

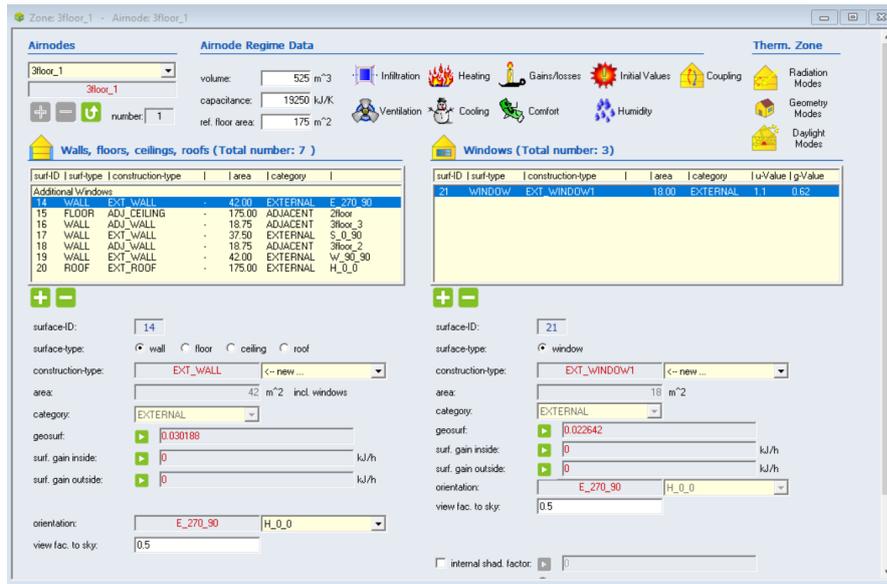


Figura 4.6: Zona termica

L'inerzia di ogni area è stata poi modificata manualmente moltiplicando l'area di riferimento per il valore di inerzia per metro quadrato definito nella tabella 4.2.

L'ultimo parametro selezionato nel modello dell'edificio è la precisione del calcolo della radiazione solare. Il valore massimo di precisione è stato impostato per tutte le zone termiche.

4.3 Simulation studio

Una volta che il processo di definizione del modello dell'edificio in TRNBuild è completato, può essere importato nell'ambiente TRNSYS Simulation Studio. Al fine di semplificare il processo, si è scelto di utilizzare una procedura guidata dedicata alla realizzazione di un'analisi termica di un edificio. Alla fine della procedura, TRNSYS inserisce nell'ambiente di simulazione diversi types utili per l'analisi dell'edificio, come mostrato nella figura 4.7.

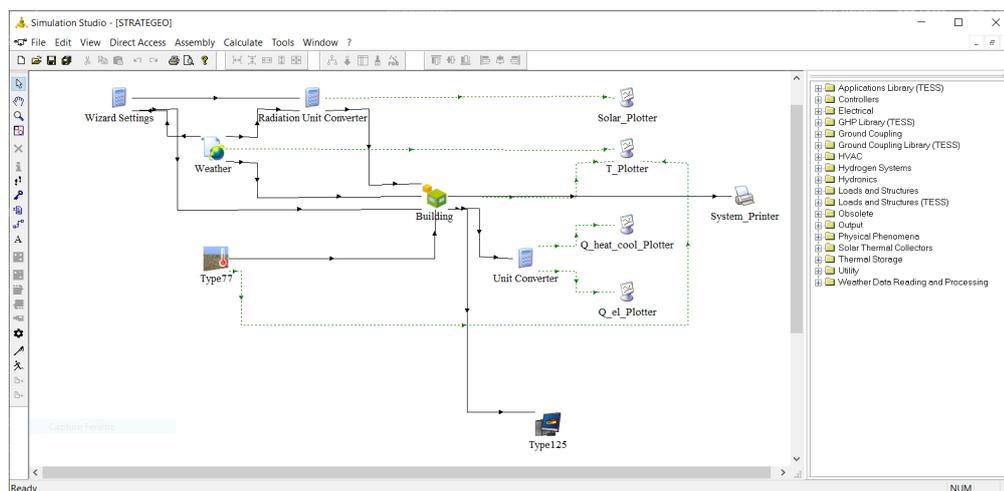


Figura 4.7: Simulation Studio

L'ambiente di simulazione è popolato da diversi types collegati. Nella parte destra della figura 4.7, potete trovare tutti i types che possono essere inseriti, divisi per categoria. Tutti i types presenti nella simulazione sono specificati di seguito.

- **Wizard settings**: è un'equazione che contiene i parametri definiti nella fase di importazione del modello dell'edificio. Contiene informazioni specifiche come l'emisfero e l'orientamento dell'edificio rispetto ai punti cardinali.
- **Type 15**: questo type contiene il foglio meteo con tutte le informazioni meteorologiche per la località scelta. Per il caso in questione, è stata scelta la città di Parigi.
- **Radiation Unit Conversion**: l'equazione è usata per trasformare i dati della radiazione solare nel foglio meteo, tenendo conto dell'orientamento dell'edificio, per fornire un input al type 56.

- Type 77: questo componente modella la distribuzione verticale della temperatura del suolo data la temperatura media della superficie durante l'anno, il valore della temperatura del suolo durante l'anno, la differenza di tempo tra l'inizio dell'anno civile e il verificarsi della temperatura minima della superficie che sono inclusi nel type 15.
- Type 125: permette la creazione di un documento di output che può essere interpretato da Google SketchUp e Trnsys3d per la rappresentazione nel modello 3D della temperatura delle aree dell'edificio.
- Unit converter converte i risultati da $kJ/(hm^2)$ a W/m^2
- Type 65: "Online plotter" consente di tracciare un grafico in tempo reale, mentre il programma esegue la simulazione ed è molto utile per confrontare immediatamente i risultati. In questo caso ce ne sono tre: "Solar plotter" ; "T plotter" ; "Heating and cooling plotter".
- Type 56: Questo componente modella il comportamento termico di un edificio diviso in diverse zone termiche, modellate in TRNBuild. Nel nostro caso l'edificio modellato nella sezione precedente.

L'intervallo di simulazione è fissato a un anno, dal 1° gennaio al 31 dicembre. Di seguito l'evoluzione della temperatura per la località selezionata, ottenuta dal type 15.

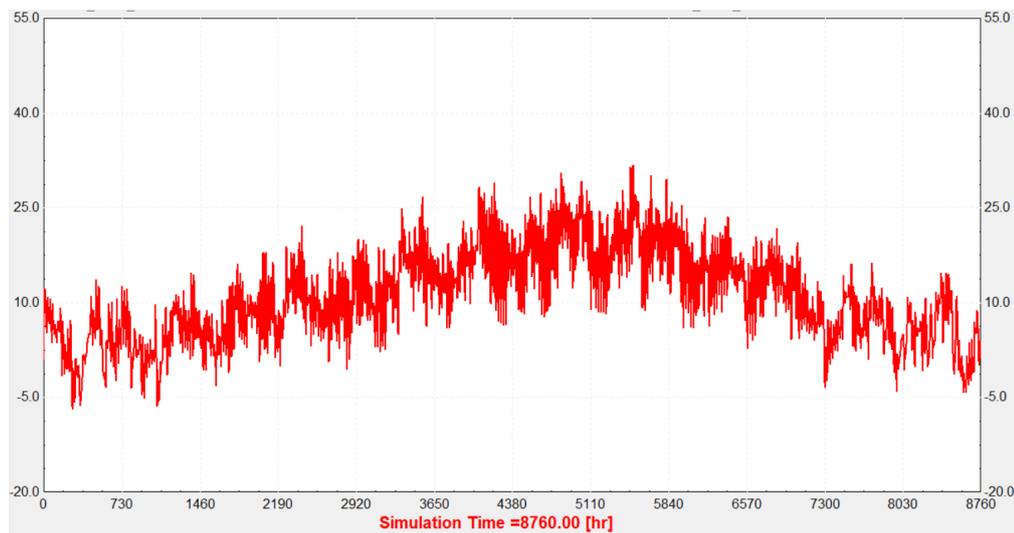


Figura 4.8: Evoluzione della temperatura a Parigi durante l'anno

Il diagramma in Simulation Studio è lo stesso per tutti gli scenari analizzati, infatti le modifiche sono state fatte a livello dell'edificio, con TRNBuild. Per inserire le diverse versioni dell'edificio, basta selezionare il type 56 in Simulation Studio e impostare il file esterno desiderato.

4.4 Implementazione di un'accensione programmata del riscaldamento

Anche se tutti gli scenari nella tabella 4.2 si riferiscono allo stesso edificio, alcuni variano per il modo in cui i requisiti termici sono soddisfatti e questo gioca un ruolo importante nei valori massimi della domanda di potenza ed energia.

Il calcolo dei fabbisogni energetici in TRNSYS viene effettuato considerando l'energia ceduta dal sistema di riscaldamento all'edificio per garantire la temperatura di setpoint, ovvero la temperatura che si desidera avere all'interno dell'edificio nei periodi di occupazione, che nel caso in esame è stata fissata a 21 °C. In una fase preliminare della simulazione non è tuttavia possibile definire una potenza del sistema di riscaldamento, essendo quest'ultima legata ai bisogni termici.

Il software per default imposta una potenza del sistema di riscaldamento illimitata, ovvero in grado di far variare la temperatura in modo importante anche in tempi molto brevi. Una scelta di questo tipo è volta al calcolo dei fabbisogni energetici, ricavati dall'energia effettivamente ceduta dal sistema di riscaldamento fittizio con potenza illimitata all'edificio. Questo processo da una parte ci permette di calcolare i fabbisogni energetici ma porta, per il calcolo della potenza, a picchi molto alti, discostandosi dalla realtà.

Lo scopo di questo lavoro è capire se e in che misura la modalità di avvio del riscaldamento possa avere un'influenza sul dimensionamento del sistema di riscaldamento. Vogliamo quindi definire una temperatura di consegna, ovvero l'andamento della temperatura minima che vogliamo avere all'interno dell'edificio nel periodo di riscaldamento, tale per cui la potenza disponibile del sistema di riscaldamento non viene mai superata.

Come mostrato nella Figura 4.9, quando la temperatura effettiva all'interno dell'edificio (in arancione) si abbassa a causa delle dispersioni ed incontra la temperatura di consegna (in blu), il sistema di riscaldamento si attiva al fine garantire la temperatura desiderata per il periodo di occupazione seguente senza superare la potenza disponibile.

Il grafico mostra l'andamento settimanale della temperatura di consegna. Si può notare che la prima parte si riferisce al fine settimana, infatti per l'ufficio in questione questo periodo è di non-occupazione e dunque la temperatura può scendere

sotto ai 21 °C.

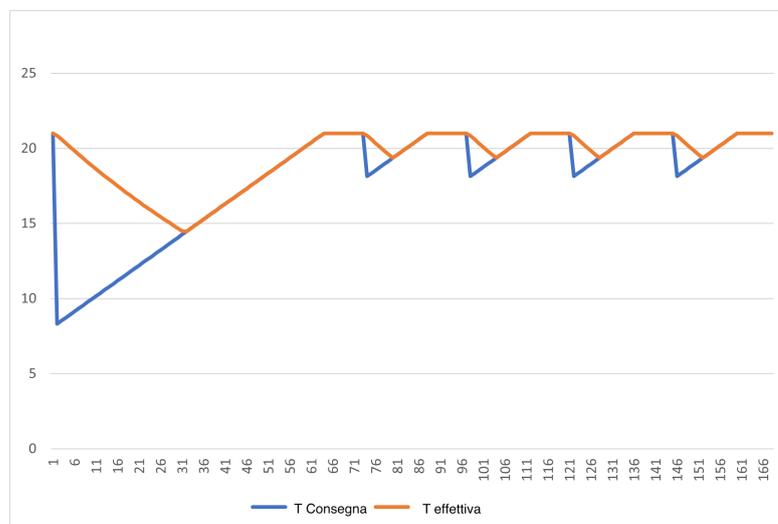


Figura 4.9: Evoluzione della temperatura di consegna e di quella effettiva

Per gli edifici definiti dai casi 1a e 2a, cioè con l'implementazione di una modalità di attenuazione notturna del riscaldamento e una potenza limitata, la definizione del modello matematico è presentata di seguito.

4.4.1 Valore delle dispersioni di volume

Per impostare un modello che permetta di definire un'attenuazione notturna del riscaldamento, è stato innanzitutto necessario dedurre il valore della potenza massima da installare e per farlo si è scelto di partire dal coefficiente di perdita di volume G. Anche se TRNSYS implementa una funzione che permette di calcolare direttamente il valore delle perdite statiche dell'edificio, per ottenere valori G comparabili, è stato necessario aggiungere alle dispersioni statiche quelle relative alle infiltrazioni e alla ventilazione.

Inoltre, per comprendere appieno i risultati prodotti dal software, si è deciso di definire un modello fittizio con una temperatura esterna costante a -7 °C e una temperatura interna di 21 °C. Inoltre, tutti gli apporti di energia interna e solare sono stati rimossi per ottenere il valore delle perdite statiche dell'edificio. A tale scopo la ventilazione continua è stata impostata a 1 vol/h e il valore delle infiltrazioni a 0,05 vol/h.

Per la definizione della temperatura di ingresso della ventilazione, è stata utilizzata

l'equazione di ventilazione a doppio flusso, presente nella documentazione del software, con un'efficienza dello scambiatore di calore pari a 0,75.

$$G = \frac{P_{loss}}{V\Delta T}$$

Con

$$P_{loss} = P_{tr} + P_{inf} + P_{vent}$$

quindi pari alla somma delle perdite termiche relative alla potenza termica trasmessa dalle pareti e quelle relative alle infiltrazioni e alla ventilazione; ΔT è la differenza di temperatura tra interno ed esterno; nel caso fittizio analizzato, pari a 28 °C; V è il volume dell'edificio.

4.4.2 Temperatura di consegna

Utilizzando i valori ottenuti del modello, è stato raggiunto un valore di $G=0,3$. Questo valore è conforme al tipo di edificio e alle norme vigenti. Per definire la modalità di attenuazione notturna, dobbiamo specificare le temperature di riferimento che saranno implementate in TRNSYS per non superare il valore della potenza installata. Il processo illustrato di seguito è lo stesso per i casi 1a e 2a, solo il valore dell'inerzia varia. Il valore di perdita P_{loss} definisce la potenza necessaria per mantenere costante la temperatura nel caso estremo in cui la temperatura esterna è $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e la temperatura interna è $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuttavia, per garantire un sistema di riscaldamento in grado di far variare la temperatura, dobbiamo assicurarci che la potenza disponibile sia superiore a quella necessaria per mantenere una temperatura costante. A questo proposito, è stato scelto un tasso di sovrapotenza del 20%.

$$P_{inst} = P_{loss} + P_{sur}$$

con

$$P_{sur} = 0,2P_{loss}$$

Una volta ottenuto il valore della potenza installata, possiamo definire la variazione oraria della temperatura che il sistema di riscaldamento è in grado di fornire:

$$\Delta T_{oraria} = \frac{P_{sur}}{SI}$$

Con S area dell'edificio e I inerzia per metro quadrato. La seguente tabella riassume i valori della potenza installata e del ΔT_{oraria} . Bisogna notare che per i casi 1a e 2a, che hanno inerzie diverse, i valori della potenza installata sono gli stessi, quello che cambia è la ΔT_{oraria} , e quindi la pendenza della curva della temperatura di consegna per i periodi di non occupazione.

Tabella 4.5: Valori di potenza installata

	Caso 1a	Caso 2a
P_{loss}	26 460	26 460
P_{sur}	5 300	5 300
P_{inst}	31 798	31 798
ΔT_{oraria} (consegna)	0,07	0,16

Per definire una temperatura di riferimento che varia in TRNSYS, è necessario fornire un coefficiente moltiplicativo, una "schedule" e un coefficiente additivo. Impostando la temperatura di comfort durante le ore di occupazione a 21, possiamo definire la temperatura di riferimento per il periodo non occupato, utilizzando ΔT_{oraria} , in base al numero di ore prima del periodo di occupazione, con la definizione di un coefficiente moltiplicativo.

$$C_{mult} = -\frac{\Delta T_{horaire}}{heures\ d'inoccupation}$$

Prendendo in considerazione il numero di ore prima del periodo di occupazione e il numero massimo di ore prima dell'occupazione, una schedule può essere definita e infine possiamo scrivere l'equazione della temperatura di consegna.

$$T_{consegna} = T_{setpoint} + C_{mult} * schedule$$

Con $T_{setpoint} = 21^{\circ}C$ uguale al coefficiente additivo.

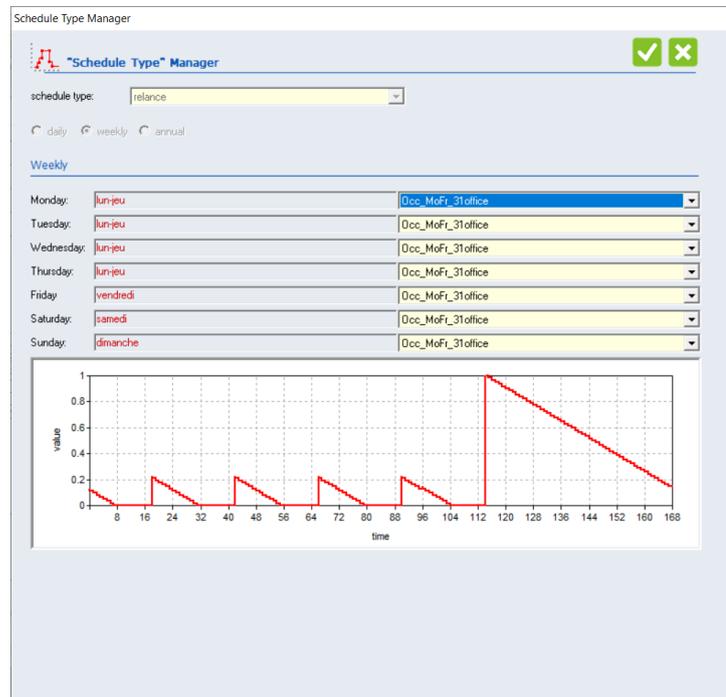


Figura 4.10: Schedule per la definizione della temperatura di consegna

Impostando la schedule in TRNBuild come mostrato in figura 4.10, è stata definita la temperatura di consegna del riscaldamento per il modello di edificio. Gli scenari con le caratteristiche di riscaldamento di default di TRNSYS, 1b e 2b, hanno un tempo di riavvio del riscaldamento di 2 ore, quindi il riscaldamento viene attivato alle 7 per raggiungere la temperatura impostata alle 9. Per riassumere, la struttura dell'edificio dei quattro scenari analizzati è la stessa, solo l'inerzia e i valori di temperatura di consegna per il riscaldamento variano.

4.5 Risultati con TRNSYS

Una volta completata la fase di sviluppo del modello dell'edificio e la definizione dell'attenuazione notturna del riscaldamento per i casi 1a e 2a, possiamo avviare la simulazione in Simulation Studio, modificando per ogni scenario analizzato il file contenente la versione dell'edificio desiderato nel type 56.

Dopo aver verificato che tutti i type sono collegati correttamente, possiamo avviare la simulazione. Mentre il software esegue la simulazione, la finestra "plotter online" si apre automaticamente e visualizza i grafici prodotti.

Come esempio, la Figura 4.11 mostra il grafico relativo alla temperatura delle aree dell'edificio durante l'anno per lo scenario 1a. Mostra anche la temperatura dell'aria esterna.

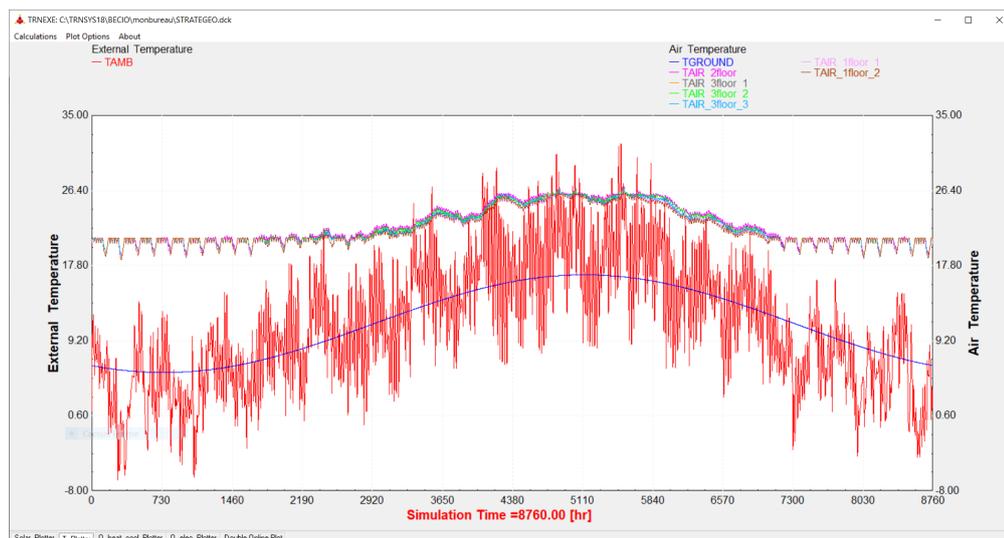


Figura 4.11: Temperature delle zone termiche per il caso 1a

Si può vedere che la temperatura si mantiene, per le ore di occupazione, tra 21 e 26 °C. Espandendo per il mese di gennaio, come mostrato nella figura 4.12, si può vedere che la modalità di attenuazione notturna del riscaldamento viene attuata correttamente.

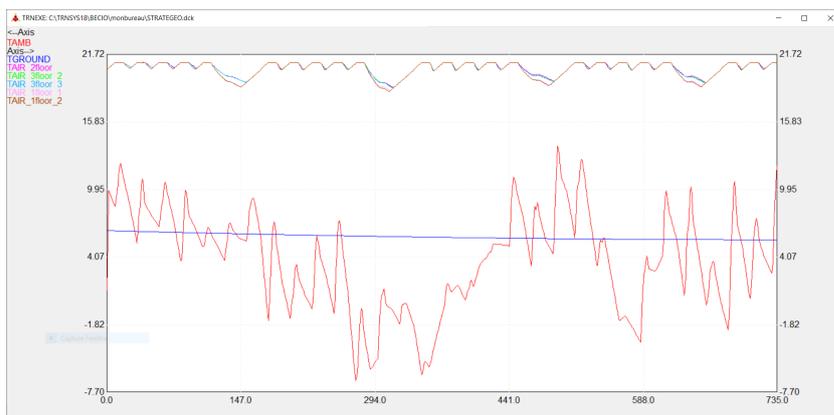


Figura 4.12: Evoluzione delle temperature per il mese di gennaio. Sono rappresentate le temperature per le diverse zone del caso 1a.

Possiamo vedere come, grazie al modello implementato, quando la temperatura di una zona incontra la temperatura di consegna, il riscaldamento si attiva e la temperatura aumenta.

Si nota anche che la temperatura interna non raggiunge la temperatura di consegna contemporaneamente per tutte le zone, questo è dovuto al tipo di orientamento e alla superficie di scambio termico con l'esterno. Vengono ora presentati due grafici con la potenza di riscaldamento richiesta per metro quadrato per i casi 1a e 1b.

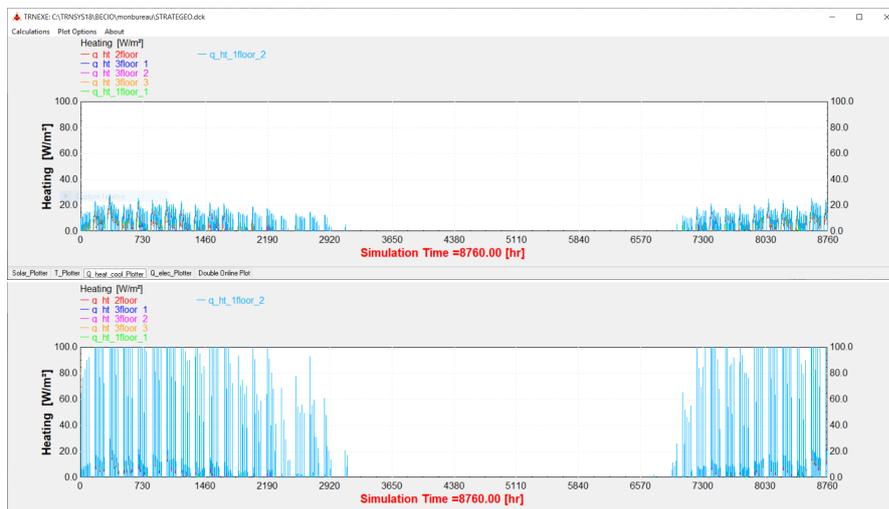


Figura 4.13: Confronto tra i fabbisogni energetici per il riscaldamento. In alto il caso 1a, in basso il caso 1b

Come mostrato nella figura, adottando una modalità di riscaldamento che preveda tempi di attivazione più lunghi e che quindi eviti che all'interno dell'edificio la temperatura si abbassi troppo, si può installare un sistema di riscaldamento con potenze molto ridotte rispetto al caso 1a.

4.5.1 Analisi dei risultati

Grazie alla definizione di un type "System plotter", è stato possibile esportare in Excel i valori della potenza termica richiesta per il riscaldamento per tutti gli scenari analizzati. I valori di potenza ed energia richiesti per i diversi scenari sono mostrati nella tabella seguente.

Tabella 4.6: Risultati relativi all'energia utilizzata e alla potenza da impiegare per i diversi casi

	Energia [MWh]	P_max [kW]
CASO 1a	23	28,4
CASO 1b	22	319,5
CASO 2a	22	31,8
CASO 2b	20,6	183,5

I risultati dei casi 1a e 2a, quelli con attenuazione notturna del riscaldamento, mostrano una capacità da installare molto più bassa dei casi 1b e 2b.

Il confronto dei fabbisogni annuali di energia per i diversi scenari è anche molto interessante. Si scopre che i casi 1a e 2a hanno una domanda energetica annuale complessiva più alta dei casi 1b e 2b. Questo è legato al fatto che essendo la temperatura interna dei casi 1a e 2a mediamente più alta di quella dei casi 1b e 2b anche il valore della potenza termica dissipata sarà più alto.

Tuttavia, questi incrementi sono molto piccoli, con aumenti di circa il 4% e ciò comporta che per un aumento limitato del fabbisogno di energia, la capacità da installare può essere notevolmente ridotta.

Tuttavia, bisogna considerare che gli scenari analizzati rappresentano situazioni relativamente estreme ma ci danno una visione generale sugli effetti che diverse modalità di riscaldamento possano avere sui fabbisogni di riscaldamento per il tipo di edificio in esame.

4.6 Predimensionamento di un sistema di riscaldamento

Per quantificare rapidamente l'impatto della modalità di avvio del riscaldamento sul consumo di elettricità, è stato sviluppato un modello semplificato per il dimensionamento di un sistema di riscaldamento che impieghi la geotermia. L'obiettivo

in questa fase del lavoro è stato quello di ottenere valori generali e indicativi in modo relativamente rapido.

Partendo dal fabbisogno di energia da fornire all'edificio ottenuto da TRNSYS, è stato stimato il consumo di elettricità nei diversi scenari.

Il punto di partenza è l'equazione caratteristica dei radiatori.

$$P = K \Delta T^n \quad (4.1)$$

- P è la potenza del radiatore espressa in watt
- K è una costante caratteristica del radiatore
- n è l'esponente di emissione del radiatore
- ΔT è la differenza tra la temperatura media dell'acqua del radiatore e la temperatura ambiente

La procedura è la stessa per i casi 1 e 2, cioè con inerzia elevata e leggera. Come potenza di progetto, prendiamo il valore della potenza massima da dissipare, definito nella tabella 4.5, ottenuto dai casi con avvio del riscaldamento rapido.

Le ipotesi sono le seguenti:

Tabella 4.7: Ipotesi per il sistema di riscaldamento

n	1,3
T_{amb}	21
$\Delta T_{radiatore}$	5
COP_{nom}	4,5
T_{nom}	35
COP_{var}	1,02

T_{amb} è la temperatura dell'ambiente da riscaldare, mantenuta costante per semplificare i calcoli, $\Delta T_{radiatore}$ è la variazione di temperatura tra l'entrata e l'uscita del radiatore, COP_{nom} è il valore nominale di COP della pompa di calore geotermica, T_{nom} è la temperatura nominale di produzione della pompa di calore, COP_{var} è la variazione per grado centigrado del COP.

Consideriamo un radiatore fittizio capace di dissipare tutta la potenza necessaria che rappresenta il sistema di riscaldamento, dal quale possiamo dedurre il valore di K. Usiamo quindi l'equazione caratteristica, ponendo la potenza massima da dissipare,

il coefficiente n e una variazione di temperatura $\Delta T_{moyenne} = T_{radiatore} - T_{amb} = 39^{\circ}C$. Con il sistema di riscaldamento definito dalle costanti K e n , possiamo calcolare per ogni ora la differenza di temperatura tra il radiatore e la stanza, per fornire la potenza termica richiesta, con la formula :

$$\Delta T = \left(\frac{P}{K} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} \quad (4.2)$$

In seguito la temperatura di produzione richiesta come segue:

$$T_{prod} = T_{amb} + \frac{\Delta T_{radiatore}}{2} + \Delta T \quad (4.3)$$

Possiamo ora calcolare il COP dalla differenza tra la temperatura di produzione effettiva e quella nominale e dalla variazione del COP.

$$COP = COP_{nom} COP_{var}^{(T_{nom} - T_{prod})} \quad (4.4)$$

Infine possiamo quindi calcolare la potenza elettrica oraria:

$$P_{elec} = \frac{P}{COP} \quad (4.5)$$

Se sommiamo la potenza elettrica oraria per tutto l'anno, otteniamo il consumo annuale di elettricità.

Possiamo anche quantificare il valore massimo della potenza elettrica. I valori dei diversi scenari sono riassunti nella tabella seguente.

Tabella 4.8: Consumo di elettricità e potenza elettrica massima

	Elettricità [MWh]	P elettrica massima [kW]
Caso 1a	4,3	5,15
Caso 1b	5,7	122,3
Caso 2a	4,2	6,4
Caso 2b	4,3	53,7

Anche se il fabbisogno energetico dei casi 1a e 2a è leggermente superiore a quello dei casi 1b e 2b, il consumo di elettricità è inferiore. Questo è dovuto al fatto che le potenze termiche sono più basse, e quindi il coefficiente di prestazione ha valori medi più alti, con un conseguente minor consumo di elettricità.

4.7 Lunghezza delle sonde da posare

Supponendo che il sistema di riscaldamento sia alimentato da una pompa di calore geotermica su sonde, è interessante quantificare la riduzione della lunghezza delle sonde da posare dovuta alla modalità di avvio del riscaldamento. La lunghezza delle sonde da installare è stata calcolata utilizzando un modello matematico basato sui valori orari della potenza termica da soddisfare. I risultati sono i seguenti:

Tabella 4.9: Lunghezza delle sonde da posare per i differenti casi

	1a	1b	2a	2b
lunghezza delle sonde da posare	397	1897	415	1118

Come si può vedere nella tabella, i casi 1a e 2a, che hanno un'attenuazione notturna del riscaldamento, hanno una lunghezza delle sonde da posare ridotte rispetto ai casi 1b e 2b.

4.8 Conclusione

Le simulazioni effettuate con il pacchetto TRNSYS hanno permesso di quantificare in termini di energia e di potenza massima da installare i vantaggi offerti da una modalità di attenuazione notturna del riscaldamento. Infatti, come dimostrano i risultati ottenuti, mantenere la temperatura media dell'edificio non troppo lontana da quella di setpoint permette una notevole riduzione della potenza da installare e quindi del costo da sostenere. Se si utilizza un sistema di riscaldamento con una pompa di calore geotermica con sonde, i vantaggi offerti da un'attenuazione notturna del riscaldamento sono molto importanti, poiché consentono di ridurre notevolmente le dimensioni delle sonde da installare. Tuttavia, va notato che i risultati ottenuti si riferiscono a un tipo specifico di edificio e che questo potrebbe influenzare i benefici ottenuti nel caso si analizzino diversi tipi di edificio.

Capitolo 5

Variazione del COP di una pompa di calore aerotermica

Un obiettivo realizzato in parallelo con i precedenti durante lo stage è stato quello di definire un modello rapido per quantificare la variazione del COP di una pompa di calore aerotermica, a partire da dati climatici orari di una località nei pressi di Parigi, Serris. In particolare, abbiamo voluto definire un metodo per valutare l'impatto dello sbrinamento e del carico parziale sul COP. Sono state fatte le seguenti ipotesi:

Tabella 5.1: Ipotesi per il calcolo del COP

T_{cond}	45 °C
ΔT_{evap}	10 °C
ΔT_{cond}	5 °C

T_{cond} è la temperatura al condensatore della pompa di calore, ΔT_{evap} è la variazione di temperatura tra l'evaporatore e la temperatura esterna, ΔT_{cond} è la variazione di temperatura tra la temperatura del condensatore e la temperatura di produzione.

5.1 COP macchina reale

L'obiettivo iniziale era di ottenere un mezzo pratico per calcolare il COP reale di una pompa di calore aerotermica in condizioni ideali.

Infatti, anche se la formula di Carnot è molto utile, rappresenta un ciclo ideale che non tiene conto delle irreversibilità di una macchina reale.

Per questo motivo è stato utilizzato il seguente metodo per ottenere un coefficiente di correzione.

Il software CoolPack è stato utilizzato per calcolare il coefficiente di prestazione di un ciclo tracciato sul diagramma di Mollier, per diverse temperature esterne presenti nel documento con i dati metereologici, imponendo un coefficiente di reversibilità della pompa di calore pari a 0,75, e come refrigerante l'R410A.

Il COP è stato poi calcolato secondo la formula di Carnot, imponendo le stesse temperature al condensatore e all'evaporatore impostate nel programma.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

In entrambi i casi, è stata impostata una temperatura al condensatore di 45 °C e una temperatura dell'evaporatore pari a $T_{evap} = T_{ext} - \Delta T_{evap}$.

Infine, è stato trovato un coefficiente η_{corr} che ha permesso di ottenere i valori ottenuti dal software con la formula di Carnot, con la seguente correzione :

$$COP_{corr} = \eta_{corr} COP_{Carnot} = \eta_{corr} \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

I valori corretti del coefficiente di Carnot sono molto simili a quelli ottenuti con il software. I valori dei test sono riassunti nella seguente tabella.

Tabella 5.2: Test per la definizione del coefficiente di correzione del COP

T_{ext}	$COP_{Mollier}$	COP_{Carnot}	COP_{corr}
-6	3,04	5,22	3,08
-3	3,2	5,49	3,24
0	3,39	5,78	3,41
3	3,6	6,12	3,61
6	3,83	6,49	3,83
9	4,09	6,92	4,08
12	4,39	7,40	4,37
15	4,74	7,95	4,69
18	5,15	8,60	5,07

Come si può notare il valore di COP_{Carnot} rimane molto prossimo a quello calcolato con il software. Chiaramente questa approssimazione vale solo mantenendo costante la temperatura al condensatore. A questo punto, è stato possibile trovare un valore approssimato del COP per tutte le temperature definite nella scheda climatica.

5.2 Lo sbrinamento

In modalità riscaldamento, il radiatore esterno funziona come un evaporatore e la sua superficie è quindi sempre a una temperatura inferiore a quella dell'aria al fine di garantire lo scambio termico, anche quando la temperatura dell'aria è già bassa, come in inverno.

In presenza di umidità nell'aria esterna, il ghiaccio può formarsi sull'evaporatore, riducendo ulteriormente l'efficienza dello scambio termico (il ghiaccio è un ottimo isolante) rispetto alla riduzione "naturale" del COP dovuto alla riduzione della temperatura esterna.

Questa è una condizione di funzionamento molto sfavorevole che può causare l'arresto della pompa di calore. Il congelamento non avviene a temperature dell'aria molto basse perché il contenuto di vapore acqueo è molto basso a queste temperature. D'altra parte, il gelamento può verificarsi a temperature dell'aria tra -5 °C e 5 °C con un'umidità relativa superiore al 60 % [10]. Nei nostri climi, questa è una condizione molto comune durante la stagione invernale. Lo sbrinamento è necessario molto prima che la batteria esterna si blocchi e deve essere automaticamente effettuato in breve tempo in modo che la pompa di calore possa riprendere a

funzionare immediatamente. Un coefficiente di correzione, denominato C1, dovuto allo sbrinamento deve quindi essere inserito.

Anche se tutte le pompe di calore sono diverse, esistono dei grafici che permettono di quantificare la riduzione del COP dovuta allo sbrinamento. In assenza di dati specifici del produttore, la penalità di congelamento viene valutata utilizzando grafici come quello della Figura ?? che mostra la variazione del coefficiente di correzione COP C1 di una pompa di calore aerotermica in funzione della temperatura esterna per diverse umidità relative.

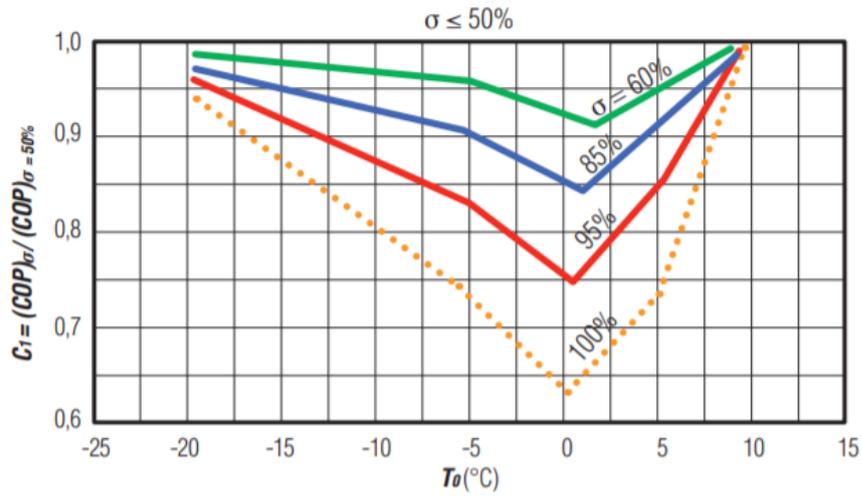


Figura 5.1: Variazione del coefficiente di correzione del COP in funzione della temperatura e dell'umidità

Il documento con i dati climatici per la località di Serris analizzata, fornisce tra le altre cose anche i valori di umidità per ogni ora dell'anno ed è stato quindi possibile implementare le funzioni descritte dal grafico in figura 5.1 per calcolare i valori del coefficiente di correzione C1 dovuto allo sbrinamento per ogni ora dell'anno.

5.3 Il carico parziale

A questo punto, vogliamo calcolare il fattore di penalizzazione C2 sul COP di una pompa di calore causato dal carico parziale. La domanda di riscaldamento dell'edificio è spesso considerata come linearmente dipendente dalla temperatura dell'aria esterna. La curva di carico parte da una temperatura dell'aria esterna al di sopra della quale non c'è bisogno di riscaldamento, poiché le dispersioni sono compensate dagli apporti di energia gratuiti: radiazione solare, energia emessa dai dispositivi elettronici, illuminazione.

L'altro punto caratteristico della curva di carico è la domanda in condizioni di progetto. La capacità della pompa di calore aerotermica va invece contro la tendenza che abbiamo appena esaminato. Infatti, la sua capacità diminuisce con l'aumentare della temperatura.

Nel caso in esame, il carico termico dell'edificio è stato fissato a 0 kW per una temperatura esterna di 16 gradi e un carico massimo di 10 kW per una temperatura esterna di -6 gradi.

La temperatura di bivalenza è la temperatura alla quale la capacità della pompa di calore soddisfa i requisiti di potenza termica dell'edificio. Nel nostro caso, è stato impostato a -2 °C. Va notato che non ha senso dimensionare una pompa di calore in grado di soddisfare il massimo fabbisogno energetico dell'edificio, nel nostro caso 10 kW a -6 °C, poiché questa è una condizione che si verifica raramente e implicherebbe un funzionamento a carico parziale per tutte le altre condizioni operative, con una conseguente riduzione del COP.

La seguente figura mostra il grafico della domanda energetica dell'edificio e la capacità disponibile della pompa di calore.

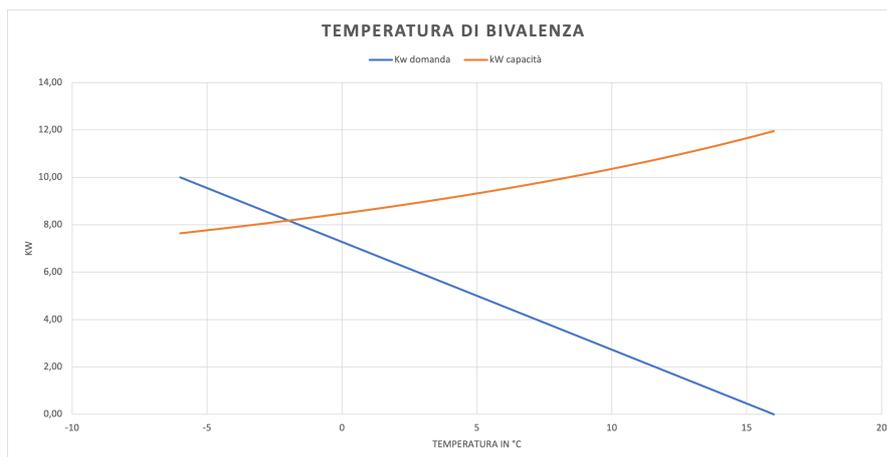


Figura 5.2: Domanda energetica dell'edificio e capacità della pompa di calore

Possiamo quindi trovare la potenza termica necessaria per soddisfare il carico termico al punto di bivalenza scelto (-2°C) e applicando la formula del COP con il coefficiente di correzione relativo al ciclo reale η_{corr} , possiamo trovare il COP al punto di bivalenza e infine la potenza elettrica della pompa di calore.

I valori sono riassunti nella seguente tabella:

Tabella 5.3: Dimensionamento della pompa di calore

T_{biv}	-2°C
P_{biv}	$8,18\text{ kW}$
COP_{biv}	$3,3$

Conoscendo i valori del punto di bivalenza e di potenza disponibile e quella da fornire, il coefficiente di correzione C_2 relativo al carico parziale può essere calcolato. Infatti, quando siamo al di sopra della temperatura di bivalenza, la capacità della pompa di calore deve essere ridotta; questa riduzione ha un effetto negativo sul COP.

Questo coefficiente è definito dalla seguente formula:

$$C_2 = 1 - C_d(1 - C_R)$$

Il C_d è determinato per mezzo di prove sperimentali o, non essendo disponibile un valore esatto, si assume il valore 0,25.

C_R è il rapporto tra il carico parziale e il pieno carico nelle stesse condizioni di temperatura.

Quindi, conoscendo il valore del fabbisogno di calore e quello relativo alla capacità della pompa di calore per ogni valore di temperatura esterna, possiamo determinare i valori di C_2 , che ridurranno il COP finale per temperature superiori al punto di bivalenza.

5.4 COP totale

Tenendo conto delle considerazioni fatte finora, possiamo definire il valore del coefficiente di rendimento nel caso analizzato come segue:

$$COP_{total} = C_1 C_2 COP_{corr}$$

Il grafico seguente mostra la riduzione del COP dovuta a questi due coefficienti. I valori si riferiscono al periodo dell'anno dal 1° gennaio al 15 aprile, quando i sistemi di riscaldamento sono accesi. In arancione il valore senza il coefficiente, in blu si considera solo la riduzione dovuta allo sbrinamento e in grigio il COP considerando i fattori C1 e C2.

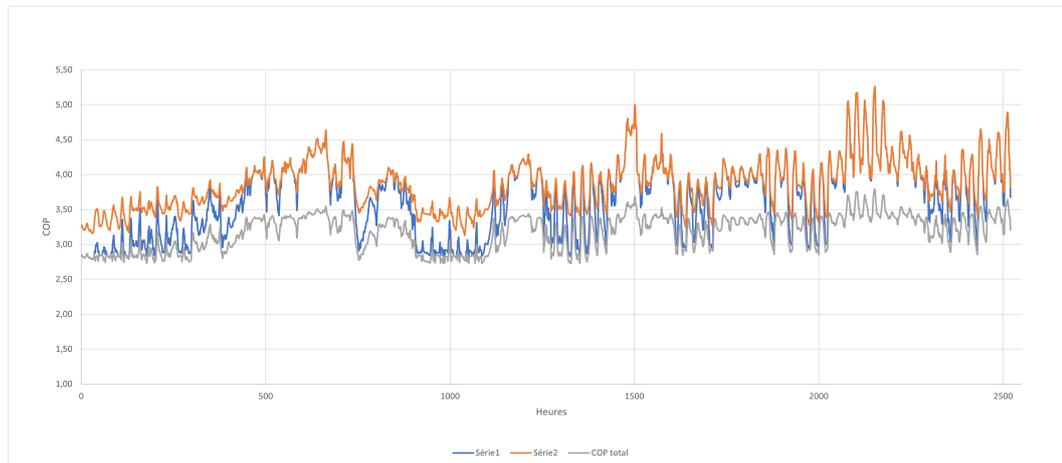


Figura 5.3: COP totale

Infine, possiamo calcolare il COP stagionale, dato dal rapporto tra l'energia termica fornita e il consumo totale di elettricità.

Tabella 5.4: COP stagionale

riscaldamento totale PAC kWh	19282,30
elettricità totale kWh	6380,17596
COP stagionale	3,02

5.5 Conclusione

Questo studio ha evidenziato come i COP reali si discostino dai COP ideali. Anche se l'entità di alcune ipotesi è grande, come la costanza della temperatura al condensatore, l'analisi permette di trarre conclusioni sull'entità della riduzione del COP delle pompe di calore ad aria. Se, d'altra parte, si considera una pompa di calore geotermica, i valori della sorgente fredda (sottosuolo) sono quasi costanti, il che permette un dimensionamento che minimizza il deterioramento delle prestazioni dovuto al carico parziale. Inoltre, le pompe di calore geotermiche non hanno problemi di sbrinamento.

Capitolo 6

Conclusione

Come si può capire dai temi analizzati, gli argomenti sviluppati durante lo stage erano numerosi.

La varietà degli argomenti ha richiesto capacità di adattamento, per accelerare il processo di avvicinamento a un nuovo argomento. Poiché il lavoro era in gran parte autonomo, ho dovuto imparare a organizzarmi, a gestire il tempo e soprattutto a risolvere autonomamente i molti problemi che incontravo. Spero sinceramente di aver contribuito allo sviluppo dell'associazione e che il mio lavoro possa essere utile alla crescita dell'AFPG. Ho sicuramente beneficiato dell'esperienza professionale, imparando a usare nuovi software e ampliando le mie competenze, soprattutto acquisendo una prospettiva pragmatica e orientata ai risultati.

Anche se l'energia geotermica in Francia ha ancora una diffusione limitata, potrebbe diventare molto importante nei prossimi anni in quanto permette di riscaldare e raffreddare con un basso impatto ambientale ed è proprio l'anima verde dell'associazione che mi ha dato entusiasmo, in quanto sono molto interessato alla questione del cambiamento climatico.

Anche se non è stato molto facile entrare per la prima volta in un ambiente di lavoro, sono molto soddisfatto del tempo che ho trascorso lavorando per AFPG.

Appendice A

TRNSYS INPUT FILE

```
VERSION 18
*****
*** TRNSYS input file (deck) generated by TrnsysStudio
*** on jeudi, décembre 10, 2020 at 20:42
*** from TrnsysStudio project: C:\TRNSYS18\BECIO\monbureau\STRATEGEO.tpf
***
*** If you edit this file, use the File/Import TRNSYS Input File function in
*** TrnsysStudio to update the project.
***
*** If you have problems, questions or suggestions please contact your local
*** TRNSYS distributor or mailto:software@cstb.fr
***
*****
*** Units
*****
*** Control cards
*****
* START, STOP and STEP
CONSTANTS 3
START=0
STOP=8760
STEP=1
SIMULATION START STOP STEP ! Start time End time Time step
TOLERANCES 0.001 0.001 ! Integration Convergence
LIMITS 30 30 30 ! Max iterations Max warnings Trace limit
DFQ 1 ! TRNSYS numerical integration solver method
WIDTH 80 ! TRNSYS output file width, number of characters
LIST ! NOLIST statement
! MAP statement
SOLVER 0 1 1 ! Solver statement Minimum relaxation factor Maximum relaxation factor
NAN_CHECK 0 ! Nan DEBUG statement
OVERWRITE_CHECK 0 ! Overwrite DEBUG statement
TIME_REPORT 0 ! disable time report
EQSOLVER 0 ! EQUATION SOLVER statement
* User defined CONSTANTS
*USER_CONSTANTS
*USER_CONSTANTS_END
* EQUATIONS "Wizard Settings"
*
EQUATIONS 12
HEMISPHERE = 1 ! hemisphere of weather data location (northern hemisphere: 1, southern hemisphere: -1)
TURN = HEMISPHERE * 0 ! rotation angle of scene (building & shaders) used for adapting azimuth angles
TBOUNDARY = 20 ! boundary temperature of surfaces (used by Type 56 - Multizone Building Model)
SHADE_CLOSE = 170* 3.6 ! Close blinds - radiation on facade in [W/m2 * 3.6]=[kJ/hr] (used by Type 56 - Multizone Building Model)
SHADE_OPEN = 120 * 3.6 ! Open blinds - radiation on facade in [W/m2 * 3.6]=[kJ/hr] (used by Type 56 - Multizone Building Model)
MAX_ISHADE = 70/100 ! Maximum opaque fraction of internal shading device (used by Type 56 - Multizone Building Model)
MAX_ESHADE = 70/100 ! Maximum opaque fraction of external shading device (used by Type 56 - Multizone Building Model)
h_DEPTH = 1 ! ground temperature depth [m] (used by Type 77 - Simple Ground Temperature Model)
T_MEAN = 11.2 ! mean annual ambient tempereure [C] (used by Type 77 - Simple Ground Temperature Model)
```

TRNSYS INPUT FILE

```

T_AMPLITUDE = 7.8      ! max. annual amplitude of ambient temperature [C] (used by Type 77 - Simple Ground Temperature Model)
t.T_MIN = 12          ! time shift of min. annual temperature [C] (used by Type 77 - Simple Ground Temperature Model)
WindDir = MOD([15,9]+TURN/HEMISPHERE,360) + LT([15,9]+TURN/HEMISPHERE,0)*(360)      ! wind direction corrected by scene rotation angle (0..360 deg)
*UNIT_NAME Wizard Settings
*LAYER Main
*POSITION 109 101
*UNIT_NUMBER 1
*-----
* EQUATIONS "Radiation Unit Converter"
*
EQUATIONS 23
AZEN = [15,16] ! [deg] solar zenith angle
AAZM = [15,17] ! [deg] solar azimuth angle
AAZM_TYPE56 = AAZM - (TURN) ! [deg] solar azimuth corrected by building rotation - Input for Type 56 sun position for SHM and ISM
AA_H_0_0 = 0 + TURN ! [deg] azimuth angle of orientation
AA_S_0_90 = 0 + TURN ! [deg] azimuth angle of orientation
AA_W_90_90 = 90 + TURN ! [deg] azimuth angle of orientation
AA_N_180_90 = 180 + TURN ! [deg] azimuth angle of orientation
AA_E_270_90 = 270 + TURN ! [deg] azimuth angle of orientation
IT_H_0_0 = [15,24]/3.6
IB_H_0_0 = [15,29]/3.6
AI_H_0_0 = [15,49]
IT_S_0_90 = [15,25]/3.6
IB_S_0_90 = [15,30]/3.6
AI_S_0_90 = [15,50]
IT_W_90_90 = [15,26]/3.6
IB_W_90_90 = [15,31]/3.6
AI_W_90_90 = [15,51]
IT_N_180_90 = [15,27]/3.6
IB_N_180_90 = [15,32]/3.6
AI_N_180_90 = [15,52]
IT_E_270_90 = [15,28]/3.6
IB_E_270_90 = [15,33]/3.6
AI_E_270_90 = [15,53]
*UNIT_NAME Radiation Unit Converter
*LAYER Main
*POSITION 412 101
*UNIT_NUMBER 2
*-----
* Model "Weather" (Type 15)
*
UNIT 15 TYPE 15 Weather
*UNIT_NAME Weather
*MODEL .\Weather Data Reading and Processing\Standard Format\Meteonorm Files (TM2)\Type15-6.tmf
*POSITION 253 181
*LAYER Weather - Data Files # #
PARAMETERS 21
6 ! 1 File Type
30 ! 2 Logical unit
3 ! 3 Tilted Surface Radiation Mode
0.2 ! 4 Ground reflectance - no snow
0.7 ! 5 Ground reflectance - snow cover
5 ! 6 Number of surfaces
1 ! 7 Tracking mode-1
0 ! 8 Slope of surface-1
AA_H_0_0 ! 9 Azimuth of surface-1
1 ! 10 Tracking mode-2
90 ! 11 Slope of surface-2
AA_S_0_90 ! 12 Azimuth of surface-2
1 ! 13 Tracking mode-3
90 ! 14 Slope of surface-3
AA_W_90_90 ! 15 Azimuth of surface-3
1 ! 16 Tracking mode-4
90 ! 17 Slope of surface-4
AA_N_180_90 ! 18 Azimuth of surface-4
1 ! 19 Tracking mode-5
90 ! 20 Slope of surface-5
AA_E_270_90 ! 21 Azimuth of surface-5
*** External files
ASSIGN "C:\TRNSYS18\Weather\Meteonorm\Europe\FR-Paris-Montsouris-71560.tmf" 30
*!? Which file contains the Meteonorm weather data? |1000
*-----
* Model "Type77" (Type 77)
*
UNIT 77 TYPE 77 Type77
*UNIT_NAME Type77
*MODEL .\Physical Phenomena\Simple Ground Temperature Model\Type77.tmf
*POSITION 258 354
*LAYER Main # #
PARAMETERS 8
1 ! 1 Number of temperature nodes

```

TRNSYS INPUT FILE

```

T_MEAN ! 2 Mean surface temperature
T_AMPLITUDE ! 3 Amplitude of surface temperature
t_T_MIN ! 4 Time shift
8.72 ! 5 Soil thermal conductivity
3200.0 ! 6 Soil density
0.84 ! 7 Soil specific heat
h_depth ! 8 Depth at point
-----
* Model "Building" (Type 56)
*
UNIT 56 TYPE 56 Building
*UNIT_NAME Building
*MODEL .\Loads and Structures\Multi-Zone Building\Type56.tmf
*POSITION 601 256
*LAYER Main # #
##
PARAMETERS 3
31 ! 1 Logical unit for building description file (*.b18, *.b17, *.bui)
0 ! 2 Star network calculation switch
0.50 ! 3 Weighting factor for operative temperature
INPUTS 13
15,1 ! Weather:Dry bulb temperature -> 1- TAMB
15,7 ! Weather:Percent relative humidity -> 2- RELHUMAMB
15,4 ! Weather:Effective sky temperature -> 3- TSKY
15,1 ! Weather:Dry bulb temperature -> 4- TSGRD
15,16 ! Weather:Solar zenith angle -> 5- AZEN
AAZM_TYPE56 ! Radiation Unit Converter:AAZM_TYPE56 -> 6- AAZM
15,91 ! Weather:Ground reflectance -> 7- GRDREF
77,1 ! Type77:Soil Temperature at Node -> 8- TGROUND
TBOUNDARY ! Wizard Settings:TBOUNDARY -> 9- TBOUNDARY
SHADE_CLOSE ! Wizard Settings:SHADE_CLOSE -> 10- SHADE_CLOSE
SHADE_OPEN ! Wizard Settings:SHADE_OPEN -> 11- SHADE_OPEN
MAX_ISHADE ! Wizard Settings:MAX_ISHADE -> 12- MAX_ISHADE
MAX_ESHADE ! Wizard Settings:MAX_ESHADE -> 13- MAX_ESHADE
*** INITIAL INPUT VALUES
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
*** External files
ASSIGN "stratego_legere_B.b18" 31
*!? Building description file (*.b18, *.b17, *.bui) |1000
-----
* EQUATIONS "Unit Converter"
*
EQUATIONS 24
q_ht_2floor = [56,3]/3.6/350
q_cl_2floor = [56,4]/3.6/350
q_el_dev_2floor = [56,5]/3.6/350
q_el_arl_2floor = [56,6]/3.6/350
q_ht_3floor_1 = [56,9]/3.6/175
q_cl_3floor_1 = [56,10]/3.6/175
q_el_dev_3floor_1 = [56,11]/3.6/175
q_el_arl_3floor_1 = [56,12]/3.6/175
q_ht_3floor_2 = [56,15]/3.6/87.5
q_cl_3floor_2 = [56,16]/3.6/87.5
q_el_dev_3floor_2 = [56,17]/3.6/87.5
q_el_arl_3floor_2 = [56,18]/3.6/87.5
q_ht_3floor_3 = [56,21]/3.6/87.5
q_cl_3floor_3 = [56,22]/3.6/87.5
q_el_dev_3floor_3 = [56,23]/3.6/87.5
q_el_arl_3floor_3 = [56,24]/3.6/87.5
q_ht_ifloor_1 = [56,27]/3.6/175
q_cl_ifloor_1 = [56,28]/3.6/175
q_el_dev_ifloor_1 = [56,29]/3.6/175
q_el_arl_ifloor_1 = [56,30]/3.6/175
q_ht_ifloor_2 = [56,33]/3.6/175
q_cl_ifloor_2 = [56,34]/3.6/175
q_el_dev_ifloor_2 = [56,35]/3.6/175
q_el_arl_ifloor_2 = [56,36]/3.6/175
*UNIT_NAME Unit Converter
*LAYER Main
*POSITION 746 354
*UNIT_NUMBER 3
-----
* Model "Solar_Plotter" (Type 65)
*
UNIT 65 TYPE 65 Solar_Plotter
*UNIT_NAME Solar_Plotter
*MODEL .\Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d.tmf
*POSITION 905 101
*LAYER Main # #
PARAMETERS 12
10 ! 1 Nb. of left-axis variables

```

TRNSYS INPUT FILE

```

10 ! 2 Nb. of right-axis variables
0.0 ! 3 Left axis minimum
1000.0 ! 4 Left axis maximum
0.0 ! 5 Right axis minimum
1000.0 ! 6 Right axis maximum
1 ! 7 Number of plots per simulation
12 ! 8 X-axis gridpoints
0 ! 9 Shut off Online w/o removing
-1 ! 10 Logical unit for output file
0 ! 11 Output file units
0 ! 12 Output file delimiter
INPUTS 20
IT_H_0_0 ! Radiation Unit Converter:IT_H_0_0 ->Left axis variable-1
IT_S_0_90 ! Radiation Unit Converter:IT_S_0_90 ->Left axis variable-2
IT_W_90_90 ! Radiation Unit Converter:IT_W_90_90 ->Left axis variable-3
IT_N_180_90 ! Radiation Unit Converter:IT_N_180_90 ->Left axis variable-4
IT_E_270_90 ! Radiation Unit Converter:IT_E_270_90 ->Left axis variable-5
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-6
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-10
IB_H_0_0 ! Radiation Unit Converter:IB_H_0_0 ->Right axis variable-1
IB_S_0_90 ! Radiation Unit Converter:IB_S_0_90 ->Right axis variable-2
IB_W_90_90 ! Radiation Unit Converter:IB_W_90_90 ->Right axis variable-3
IB_N_180_90 ! Radiation Unit Converter:IB_N_180_90 ->Right axis variable-4
IB_E_270_90 ! Radiation Unit Converter:IB_E_270_90 ->Right axis variable-5
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-6
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-10
*** INITIAL INPUT VALUES
IT_H_0_0 IT_S_0_90 IT_W_90_90 IT_N_180_90 IT_E_270_90 label label label
label label IB_H_0_0 IB_S_0_90 IB_W_90_90 IB_N_180_90 IB_E_270_90 label
label label label label
LABELS 3
"Total Incident Solar Radition [W/m²]"
"Beam Incident Solar Radition [W/m²]"
"Solar_Plotter"
-----
* Model "T_Plotter" (Type 65)
*
UNIT 66 TYPE 65 T_Plotter
*UNIT_NAME T_Plotter
*MODEL .\Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d.tmf
*POSITION 903 181
*LAYER Main # #
PARAMETERS 12
10 ! 1 Nb. of left-axis variables
10 ! 2 Nb. of right-axis variables
-30.0 ! 3 Left axis minimum
80.0 ! 4 Left axis maximum
-30.0 ! 5 Right axis minimum
80.0 ! 6 Right axis maximum
1 ! 7 Number of plots per simulation
12 ! 8 X-axis gridpoints
0 ! 9 Shut off Online w/o removing
-1 ! 10 Logical unit for output file
0 ! 11 Output file units
0 ! 12 Output file delimiter
INPUTS 20
15,1 ! Weather:Dry bulb temperature ->Left axis variable-1
56,2 ! Building: 2- TOP_2floor ->Left axis variable-2
56,8 ! Building: 8- TOP_3floor_1 ->Left axis variable-3
56,14 ! Building: 14- TOP_3floor_2 ->Left axis variable-4
56,20 ! Building: 20- TOP_3floor_3 ->Left axis variable-5
56,26 ! Building: 26- TOP_ifloor_1 ->Left axis variable-6
56,32 ! Building: 32- TOP_ifloor_2 ->Left axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-10
77,1 ! Type77:Soil Temperature at Node ->Right axis variable-1
56,1 ! Building: 1- TAIR_2floor ->Right axis variable-2
56,7 ! Building: 7- TAIR_3floor_1 ->Right axis variable-3
56,13 ! Building: 13- TAIR_3floor_2 ->Right axis variable-4
56,19 ! Building: 19- TAIR_3floor_3 ->Right axis variable-5
56,25 ! Building: 25- TAIR_ifloor_1 ->Right axis variable-6
56,31 ! Building: 31- TAIR_ifloor_2 ->Right axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-9

```

TRNSYS INPUT FILE

```

0,0 ! [unconnected] Right axis variable-10
*** INITIAL INPUT VALUES
TAMB TOP_2floor TOP_3floor_1 TOP_3floor_2 TOP_3floor_3 TOP_ifloor_1
TOP_ifloor_2 label label label TGROUND TAIR_2floor TAIR_3floor_1 TAIR_3floor_2
TAIR_3floor_3 TAIR_ifloor_1 TAIR_ifloor_2 label label label
LABELS 3
"Operative Temperature"
"Air Temperature"
"T_Plotter"
-----
* Model "Q_heat_cool_Plotter" (Type 65)
*
UNIT 67 TYPE 65 Q_heat_cool_Plotter
*UNIT_NAME Q_heat_cool_Plotter
*MODEL .\Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d.tmf
*POSITION 905 301
*LAYER Main # #
PARAMETERS 12
10 ! 1 Nb. of left-axis variables
10 ! 2 Nb. of right-axis variables
0.0 ! 3 Left axis minimum
100.0 ! 4 Left axis maximum
0.0 ! 5 Right axis minimum
100.0 ! 6 Right axis maximum
1 ! 7 Number of plots per simulation
12 ! 8 X-axis gridpoints
0 ! 9 Shut off Online w/o removing
-1 ! 10 Logical unit for output file
0 ! 11 Output file units
0 ! 12 Output file delimiter
INPUTS 20
q_ht_2floor ! Unit Converter:q_ht_2floor ->Left axis variable-1
q_ht_3floor_1 ! Unit Converter:q_ht_3floor_1 ->Left axis variable-2
q_ht_3floor_2 ! Unit Converter:q_ht_3floor_2 ->Left axis variable-3
q_ht_3floor_3 ! Unit Converter:q_ht_3floor_3 ->Left axis variable-4
q_ht_ifloor_1 ! Unit Converter:q_ht_ifloor_1 ->Left axis variable-5
q_ht_ifloor_2 ! Unit Converter:q_ht_ifloor_2 ->Left axis variable-6
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-10
q_cl_2floor ! Unit Converter:q_cl_2floor ->Right axis variable-1
q_cl_3floor_1 ! Unit Converter:q_cl_3floor_1 ->Right axis variable-2
q_cl_3floor_2 ! Unit Converter:q_cl_3floor_2 ->Right axis variable-3
q_cl_3floor_3 ! Unit Converter:q_cl_3floor_3 ->Right axis variable-4
q_cl_ifloor_1 ! Unit Converter:q_cl_ifloor_1 ->Right axis variable-5
q_cl_ifloor_2 ! Unit Converter:q_cl_ifloor_2 ->Right axis variable-6
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-10
*** INITIAL INPUT VALUES
q_ht_2floor q_ht_3floor_1 q_ht_3floor_2 q_ht_3floor_3 q_ht_ifloor_1
q_ht_ifloor_2 label label label label q_cl_2floor q_cl_3floor_1 q_cl_3floor_2
q_cl_3floor_3 q_cl_ifloor_1 q_cl_ifloor_2 label label label label
LABELS 3
"Heating [W/m²]"
"Cooling [W/m²]"
"Q_heat_cool_Plotter"
-----
* Model "Q_el_Plotter" (Type 65)
*
UNIT 68 TYPE 65 Q_el_Plotter
*UNIT_NAME Q_el_Plotter
*MODEL .\Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d.tmf
*POSITION 905 407
*LAYER Main # #
PARAMETERS 12
10 ! 1 Nb. of left-axis variables
10 ! 2 Nb. of right-axis variables
0.0 ! 3 Left axis minimum
100.0 ! 4 Left axis maximum
0.0 ! 5 Right axis minimum
100.0 ! 6 Right axis maximum
1 ! 7 Number of plots per simulation
12 ! 8 X-axis gridpoints
0 ! 9 Shut off Online w/o removing
-1 ! 10 Logical unit for output file
0 ! 11 Output file units
0 ! 12 Output file delimiter
INPUTS 20

```

TRNSYS INPUT FILE

```

q_el_dev_2floor ! Unit Converter:q_el_dev_2floor ->Left axis variable-1
q_el_dev_3floor_1 ! Unit Converter:q_el_dev_3floor_1 ->Left axis variable-2
q_el_dev_3floor_2 ! Unit Converter:q_el_dev_3floor_2 ->Left axis variable-3
q_el_dev_3floor_3 ! Unit Converter:q_el_dev_3floor_3 ->Left axis variable-4
q_el_dev_1floor_1 ! Unit Converter:q_el_dev_1floor_1 ->Left axis variable-5
q_el_dev_1floor_2 ! Unit Converter:q_el_dev_1floor_2 ->Left axis variable-6
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Left axis variable-10
q_el_arl_2floor ! Unit Converter:q_el_arl_2floor ->Right axis variable-1
q_el_arl_3floor_1 ! Unit Converter:q_el_arl_3floor_1 ->Right axis variable-2
q_el_arl_3floor_2 ! Unit Converter:q_el_arl_3floor_2 ->Right axis variable-3
q_el_arl_3floor_3 ! Unit Converter:q_el_arl_3floor_3 ->Right axis variable-4
q_el_arl_1floor_1 ! Unit Converter:q_el_arl_1floor_1 ->Right axis variable-5
q_el_arl_1floor_2 ! Unit Converter:q_el_arl_1floor_2 ->Right axis variable-6
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-7
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-8
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-9
0,0 ! [unconnected] Right axis variable-10
*** INITIAL INPUT VALUES
q_el_dev_2floor q_el_dev_3floor_1 q_el_dev_3floor_2 q_el_dev_3floor_3
q_el_dev_1floor_1 q_el_dev_1floor_2 label label label label q_el_arl_2floor
q_el_arl_3floor_1 q_el_arl_3floor_2 q_el_arl_3floor_3 q_el_arl_1floor_1
q_el_arl_1floor_2 label label label label
LABELS 3
"Electricity Equipment [W/m²]"
"Electricity Artificial Lighting [W/m²]"
"Q_elec_Plotter"
-----
* Model "System_Printer" (Type 25)
*
UNIT 12 TYPE 25 System_Printer
*UNIT_NAME System_Printer
*MODEL \TRNSYS18\Studio\lib\System_Output\Type25a.tmf
*POSITION 1089 256
*LAYER OutputSystem #
PARAMETERS 10
STEP ! 1 Printing interval
START ! 2 Start time
STOP ! 3 Stop time
32 ! 4 Logical unit
2 ! 5 Units printing mode
0 ! 6 Relative or absolute start time
-1 ! 7 Overwrite or Append
-1 ! 8 Print header
0 ! 9 Delimiter
1 ! 10 Print labels
INPUTS 1
56,37 ! Building: 37- SQHEAT_1 ->Input to be printed
*** INITIAL INPUT VALUES
SQHEAT_1
*** External files
ASSIGN "***.out" 32
*!? Which file should contain the printed results? You can use the deck filename by entering "****", e.g. "***.out", or "***.dat" |1000
-----
* Model "Type125" (Type 125)
*
UNIT 13 TYPE 125 Type125
*UNIT_NAME Type125
*MODEL .\Output\TRNSYS Plugin for SketchUp Printer\Type125.tmf
*POSITION 778 616
*LAYER Main #
PARAMETERS 4
0 ! 1 not used
START ! 2 Start
STOP ! 3 Stop
33 ! 4 Logical Unit
INPUTS 6
56,25 ! Building: 25- TAIR_1floor_1 ->Input-1
56,31 ! Building: 31- TAIR_1floor_2 ->Input-2
56,1 ! Building: 1- TAIR_2floor ->Input-3
56,7 ! Building: 7- TAIR_3floor_1 ->Input-4
56,13 ! Building: 13- TAIR_3floor_2 ->Input-5
56,19 ! Building: 19- TAIR_3floor_3 ->Input-6
*** INITIAL INPUT VALUES
2FLOOR 3FLOOR_1 3FLOOR_2 3FLOOR_3 1FLOOR_1 1FLOOR_2
Labels 1
Temperatures
*** External files
ASSIGN "***.eso" 32

```

TRNSYS INPUT FILE

```
*! ? Name of the output file |1000
*-----
END
*! LINK_STYLE
*! LINK 56:13
*! CONNECTION_SET 40:40:0:0:6,5,4,3,2,1:0:0:0:1:630,273:660,273:660,593:767,593
*! LINK 15:1
*! CONNECTION_SET 0:0:40:40:1:0:0:0:1:236,152:184,152:184,112:129,112
*! LINK 1:2
*! CONNECTION_SET 40:20:0:20:3:0:0:0:0:129,92:392,92
*! LINK 15:2
*! CONNECTION_SET 40:0:0:40:18,17,16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6,5,4,2,1:0:0:0:0:276,152:325,154:325,109:392,112
*! LINK 15:56
*! CONNECTION_SET 40:40:0:20:7,5,4,3,2,1:0:0:0:0:276,192:325,194:325,249:583,247
*! LINK 1:56
*! CONNECTION_SET 40:40:0:40:13,12,11,10,9:0:0:0:0:129,112:200,109:200,269:583,267
*! LINK 2:56
*! CONNECTION_SET 40:40:0:0:6:0:0:0:0:432,112:500,109:500,229:583,227
*! LINK 56:3
*! CONNECTION_SET 40:40:0:20:24,23,22,21,20,19,18,17,16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1:0:0:0:0:626,270:675,269:675,345:728,348
*! LINK 2:65
*! CONNECTION_SET 40:20:0:20:15,14,13,12,11,5,4,3,2,1:32768:2:0:0:432,92:855,89:885,92
*! LINK 15:66
*! CONNECTION_SET 40:20:0:20:1:32768:2:0:0:276,172:858,174:885,172
*! LINK 77:56
*! CONNECTION_SET 40:20:20:40:8:0:0:0:0:281,345:603,345:604,267
*! LINK 77:66
*! CONNECTION_SET 40:40:40:40:11:32768:2:0:0:281,365:300,365:300,450:1000,450:1000,194:925,192
*! LINK 56:66
*! CONNECTION_SET 40:20:0:40:17,16,15,14,13,12,7,6,5,4,3,2:32768:2:0:0:624,247:825,249:825,194:885,192
*! LINK 3:67
*! CONNECTION_SET 40:0:0:20:16,15,14,13,12,11,6,5,4,3,2,1:32768:2:0:0:766,325:825,325:825,292:885,292
*! LINK 3:68
*! CONNECTION_SET 40:40:0:20:16,15,14,13,12,11,6,5,4,3,2,1:32768:2:0:0:766,365:825,365:825,398:885,398
*! LINK 56:12
*! CONNECTION_SET 40:20:0:20:1:0:0:0:1:624,247:1015,247:1069,247
*! LINK_STYLE_END
```

Bibliografia

- [1] Julien BIGORGNE. “Atténuer les îlots de chaleur urbains”. In: *Journal of applied meteorology and climatology* (2020), pp. 2051–2064. DOI: <https://www.apur.org/fr> (cit. a p. 5).
- [2] Brice Tremeac, Pierre Bousquet, Cecile de Munck, Gregoire Pigeon, Valery Masson, Colette Marchadier, Michele Merchat, Pierre Poeuf e Francis Meunier. “Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures”. In: *Applied Energy* (2012), pp. 102–110 (cit. a p. 8).
- [3] Santé publique France. *La vague de chaleur d’août 2003 : que s’est-il passé ?* URL: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaieurs-canicule/documents/article/la-vague-de-chaleur-d-aout-2003-que-s-est-il-passe> (cit. a p. 9).
- [4] Meteo France. *Le climat futur en France*. URL: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-climat-futur-en-france> (cit. alle pp. 10, 13).
- [5] International energy agency. “The future of cooling”. In: (2019), pp. 52–56 (cit. a p. 10).
- [6] S. Hassid e M. Santamouris. “The effect of the Athens heat island on air conditioning load”. In: *Energy and Buildings 32* (2000), pp. 131–141 (cit. a p. 11).
- [7] E. Marrassoa, C. Rosellia, M. Sasso e F. Tariello. “Global and local environmental and energy advantages of a geothermal heat pump interacting with a low temperature thermal micro grid”. In: *Energy Conversion and Management* (2018), pp. 540–553 (cit. a p. 13).
- [8] D. Li e E. Bou-Zeid. “Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts”. In: *Journal of applied meteorology and climatology* (2013), pp. 2051–2064 (cit. a p. 14).

- [9] *Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique*. URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus> (cit. a p. 17).
- [10] Renato Lazzarin. “POMPE di CALORE”. In: *Parte teorica e applicativa* () (cit. a p. 53).