



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA E DELL'AUTOMAZIONE

**Caratterizzazione delle curve di
regolazione di controllori per la
termoregolazione di edifici**

**Characterization of control setpoints of
controllers for building temperature
control**

Candidato:

Lorenzo Cichella

Relatore:

Prof. Andrea Bonci

Correlatore:

Francesco Perticaroli

Anno Accademico 2023-2024

Ai miei genitori e a mio fratello

A Elisa e alla sua famiglia

Ai miei amici

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione desidero esprimere la mia più sincera gratitudine a tutti coloro che mi sono stati di supporto durante questo percorso accademico di grande crescita e formazione. Per prima cosa vorrei ringraziare il mio relatore, il professor Andrea Bonci, per avermi guidato con preziosi consigli nell'attività di tirocinio. Un sentito ringraziamento al mio tutor aziendale, Francesco Perticaroli, e a tutto team del laboratorio di Sistemi di Ariston per avermi accolto calorosamente e supportato durante i mesi di stage. Un ringraziamento speciale alla mia ragazza Elisa, che per tutto il percorso universitario è stata il mio punto di riferimento, confortandomi nei momenti di difficoltà e spronandomi a dare sempre il massimo. Un pensiero alla mia famiglia, senza la quale non starei scrivendo queste righe, che è stata sempre dalla mia parte, riponendo in me fiducia e incoraggiandomi. Grazie a Luca e Cristian, amici di una vita, con cui ho condiviso i migliori momenti di gioia e difficoltà. Desidero inoltre ringraziare tutti gli altri amici che hanno contribuito a rendere questo percorso indimenticabile, ogni momento passato insieme ha arricchito la mia vita e mi ha dato la forza di andare avanti.

Ancona, Luglio 2024

Lorenzo Cichella

Abstract

This thesis aims to propose an innovative approach to the temperature regulation of climate control systems by using non-linear curves that take into account the building's thermal inertia. The procedural steps followed to achieve this goal are:

- Calculation of non-linear curves through *reverse engineering* techniques: by conducting an initial phase of testing on a commercially available Siemens controller, the second-degree polynomial equations that define the climate curves were identified.
- Calculation formula for the composite external temperature: starting from a conceptually non-implementable form analytically, a discrete-time formula was synthesized that describes the trend of the external temperature filtered through the building's time constant.
- Outdoor temperature regulation simulations: implementation of a *MatLAB* script and a *Simulink* model aimed at simulating a series of temperature regulation scenarios based on an external sensor to compare the performance of the Ariston logic (linear curves) and the Siemens logic (non-linear curves).
- Analysis of simulation results in *Dymola*: all output signals from the simulations were compared to identify any advantages and disadvantages of the two approaches.

Sommario

La presente tesi nasce con l'obiettivo di proporre un approccio innovativo alla termoregolazione di impianti climatici mediante l'uso di curve non lineari che tengano conto dell'inerzia termica dell'edificio. I passi procedurali seguiti per il raggiungimento di questo obiettivo sono:

- Calcolo delle curve non lineari attraverso tecniche di *reverse engineering*: tramite una prima fase di test condotta su un regolatore Siemens presente sul mercato, sono state intercettate le equazioni polinomiali di secondo grado che definiscono le curve climatiche
- Formula di calcolo della temperatura esterna composita: a partire da una forma concettuale non implementabile analiticamente, è stata sintetizzata una formula a tempo discreto che descrive l'andamento della temperatura esterna filtrata attraverso la costante di tempo dell'edificio.
- Simulazioni di termoregolazione Outdoor: implementazione di uno script *MatLAB* e di un modello *Simulink* volta a simulare una serie di casistiche di termoregolazione basata su sonda esterna al fine di comparare le performance della logica Ariston (curve lineari) e quella Siemens (curve non lineari).
- Analisi dei risultati delle simulazioni in *Dymola*: tutti i segnali di output sono stati confrontati sia graficamente che mediante analisi numerica, al fine di individuare eventuali vantaggi e svantaggi dei due approcci.

Indice

1	Introduzione	1
2	Sistemi HVAC	3
2.1	Sistemi di termoregolazione	5
2.2	Strategie di regolazione per impianti termici	8
2.2.1	Regolazione manuale centrale	9
2.2.2	Regolazione climatica	9
2.2.3	Regolazione a punto fisso	13
2.3	Tipologie di regolatore	15
2.3.1	Regolatore a due posizioni on/off	16
2.3.2	Regolatore proporzionale (P) o modulante	17
2.3.3	Regolatore proporzionale integrale (PI)	21
2.3.4	Regolatore Proporzionale Integrale Derivativo (PID)	24
2.4	Generatori di calore in impianti di riscaldamento	26
2.4.1	Caldaia a condensazione	28
2.4.2	Pompa di calore	31
3	Calcolo delle curve di termoregolazione non lineari attraverso tecniche di reverse engineering	35
3.1	Termoregolazione climatica e ambiente	35
3.2	Heat pump controller RVS61.843	36
3.3	Curve di termoregolazione climatiche outdoor	39
3.4	Costante di tempo dell'edificio	42
3.5	Temperatura esterna composita	44
3.6	Simulatore ACS790	45
3.7	Sintesi delle curve di termoregolazione	47
3.8	Shifting delle curve al variare del Room Setpoint	49
3.9	Plot delle curve di termoregolazione tramite regressione polinomiale	52
3.10	Validazione delle curve di termoregolazione	54
4	Formula di calcolo della temperatura esterna composita	59
4.1	Fase di test sul regolatore RVS61.843	59
4.2	Sintesi di una formula a tempo discreto della temperatura esterna composita	64
4.3	Validazione della formula	65

5	Simulazioni di termoregolazione Outdoor	69
5.1	Panoramica sul patrimonio edilizio nazionale	69
5.2	Modelli Dymola degli edifici	74
5.3	Modello MatLAB/Simulink	78
5.4	Simulazioni di termoregolazione Outdoor con confronto tra approccio Ariston e Siemens	82
5.5	Inerzia termica di strutture verticali opache	85
5.6	Simulazioni esplorative con influenza dello sfasamento termico	89
6	Analisi dei risultati delle simulazioni	91
6.1	Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens	91
6.1.1	Simulazioni edificio classe 1	91
6.1.2	Simulazioni edificio classe 2	95
6.1.3	Simulazioni edificio classe 4	101
6.1.4	Analisi numerica dei risultati	102
6.2	Risultati simulazioni esplorative sull'influenza dello sfasamento termico	103
7	Conclusioni e sviluppi futuri	107
	Appendice	109
1	Algoritmi MatLAB/Simulink	109
1.1	Plot curve di termoregolazione Outdoor non lineari	109
1.2	Validazione curve di termoregolazione Outdoor	114
1.3	Script per simulazioni di termoregolazione Outdoor	116
1.4	Script per analisi numerica delle simulazioni di termoregola- zione Outdoor	117
2	Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane	119

Elenco delle figure

2.1	Esempio di sistema HVAC	4
2.2	Esempio di impianto HVAC misto	5
2.3	Termoregolazione in catena chiusa	7
2.4	Termoregolazione in catena aperta	7
2.5	Sistema di riscaldamento di una stanza [13]	8
2.6	Regolazione climatica	12
2.7	Diagramma di regolazione climatica	13
2.8	Regolazione a punto fisso	14
2.9	Diagramma di regolazione a punto fisso	15
2.10	Diagramma di regolazione <i>ON/OFF</i> [3]	16
2.11	Regolazione grandezza	18
2.12	Risposta del sistema al variare del coefficiente K_p [14]	19
2.13	Regolatori ad azione diretta/inversa	20
2.14	Approccio proporzionale integrale	22
2.15	Sovra-elongazione della risposta in un regolatore PI	23
2.16	Risposta in un regolatore PI [14]	24
2.17	Tipico impianto di riscaldamento [16]	28
2.18	Schema di funzionamento di una caldaia a condensazione	30
2.19	Schema di funzionamento di una pompa di calore	31
3.1	RVS61.843	36
3.2	Interfaccia utente RVS	37
3.3	RVS con sonde integrate	38
3.4	Terminali di connessione RVS	39
3.5	Curve lineari Ariston	40
3.6	Curve non lineari Siemens	41
3.7	Schema circuitale filtro RC	43
3.8	Risposta in frequenza di un filtro passa basso	43
3.9	Risposta a gradino di un sistema del primo ordine	44
3.10	Interfaccia ACS	46
3.11	Schema idraulico pompa di calore	47
3.12	Grafico rette per Room Setpoint 18 °C	49
3.13	Rette di termoregolazione al variare del Room Setpoint	50
3.14	Variazione delle rette con pendenza 2.25	51
3.15	Curve non lineari calcolate	53

Elenco delle figure

3.16	Modello Simulink per la validazione delle curve	55
3.17	Validazione curve con senoide di temperature esterne	56
3.18	Validazione curve con rampa di temperature esterne	57
4.1	Primo test Tcomposite	60
4.2	Secondo test Tcomposite	61
4.3	Terzo test Tcomposite	62
4.4	Quarto test Tcomposite	63
4.5	Quinto test Tcomposite	63
4.6	Influenza BCT su Tflow	64
4.7	Modello di validazione $T_{composite}$	66
4.8	Test 1 di validazione	67
4.9	Test 2 di validazione	67
4.10	Test 3 di validazione	68
4.11	Test 4 di validazione	68
5.1	Suddivisione del territorio nazionale in 6 zone climatiche	70
5.2	Edificio classe 1	75
5.4	Edificio classe 3	75
5.3	Edificio classe 2	76
5.5	Edificio classe 4	76
5.6	Configurazione edificio classe 1 Termus-G	77
5.7	Configurazione edificio classe 4 Termus-G	78
5.8	Logica di termoregolazione Ariston	80
5.9	Formule di termoregolazione Ariston	81
5.10	Logica di termoregolazione Siemens	81
5.11	Blocco FMU e Output modello Simulink	82
5.12	Inerzia termica di una parete [25]	88
6.1	CH_target Ariston/Siemens con BCT=1	92
6.2	CH_target BCT 1-10-20	93
6.3	CH_target Ariston/Siemens con BCT=20	94
6.4	Cicli On/Off generatore	95
6.5	Portata fluido termovettore	96
6.6	Andamento Tcomposite	97
6.7	Analisi performance caso Siemens	97
6.8	Confronto Ariston Siemens con BCT = 20	98
6.9	Cicli On/Off	98
6.10	Portata del fluido termovettore	99
6.11	Analisi performance caso Siemens	99
6.12	CH target e Tzone Ariston/Siemens	100
6.13	Cicli on/off termostato	100
6.14	Portata del fluido termovettore	101

Elenco delle figure

6.15	CH target BCT 1-5	101
6.16	Edificio classe 1 con spessore 12 cm	103
6.17	Edificio classe 1 con spessore 28 cm	104
6.18	Edificio classe 4 con spessore 25 cm	104
6.19	Edificio classe 4 con spessore 42 cm	105

Elenco delle tabelle

3.1	Valori simulazione con Room Setpoint 20°	49
3.2	Shifting verticale delle curve di termoregolazione	51
3.3	Valori di mandata per validazione curve	56
3.4	Valori di mandata per validazione curve	58
5.1	Tipologie di pareti con materiali e nomenclature	72
5.2	Tipologie di pareti con nomenclature e periodi	73
5.3	Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache verticali	74
5.4	Sfasamento termico calcolato in TerMus-G delle 4 classi di edificio .	78
5.5	Simulazioni Ariston	83
5.6	Simulazioni Siemens	85
5.7	Trasmittanza termica U di riferimento delle strutture opache verticali	89
5.8	Simulazioni sfasamento Ariston	90
5.9	Simulazioni sfasamento Siemens	90
6.1	Confronto simulazioni	91
6.2	Analisi numerica Ariston	102
6.3	Analisi numerica Siemens	102
1	Caratteristiche termiche muratura in pietra	120
2	Caratteristiche termiche muratura in mattoni	121
3	Caratteristiche termiche muratura in calcestruzzo	122
4	Caratteristiche termiche muratura a sacco in mattoni	123
5	Caratteristiche termiche muratura a cassa vuota in pietra	124
6	Caratteristiche termiche muratura a cassa vuota in mattoni	125
7	Caratteristiche termiche parete in calcestruzzo	126
8	Caratteristiche termiche parete in laterizio	127
9	Caratteristiche termiche parete a cassetta	128
10	Caratteristiche termiche parete a cassetta	129
11	Caratteristiche termiche parete con paramento in mattoni - 1	130
12	Caratteristiche termiche parete con paramento in mattoni - 2	131
13	Caratteristiche termiche parete con paramento in pietra - 1	132
14	Caratteristiche termiche parete con paramento in pietra - 2	133

Capitolo 1

Introduzione

La termoregolazione degli impianti climatici rappresenta un tema di grande rilevanza ed attualità nell'ambito della gestione energetica con importanti ripercussioni sulla sostenibilità ambientale rappresentando inoltre un elemento fondamentale di ottimizzazione del comfort abitativo .

Questo progetto di tesi, svolto presso l'azienda *Ariston Group*, leader internazionale nel campo dei sistemi HVAC, ha esplorato tecniche di controllo termico innovative attraverso lo studio di curve di regolazione e l'introduzione di nuovi parametri. Uno dei concetti chiave per il raggiungimento di questi obiettivi è modificare e migliorare le tecniche classiche. Infatti da un modello tradizionale basato su curve di tipo lineare, si è passati ad un modello non lineare che introduce il concetto fondamentale di inerzia termica attraverso parametri come la costante di tempo dell'edificio, la temperatura esterna composita e lo sfasamento termico.

Più nel dettaglio, la costante di tempo dell'edificio si definisce come il tempo impiegato dalla temperatura interna dell'edificio a raggiungere il 63% della variazione totale di temperatura esterna; la temperatura esterna composita è una particolare temperatura esterna filtrata attraverso il parametro "costante di tempo dell'edificio", che agisce come un filtro passa-basso del primo ordine e consente di particularizzare ogni edificio in base alla sua inerzia e composizione costruttiva. Infine, lo sfasamento termico rappresenta la differenza di tempo fra l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie esterna della struttura, e l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie interna della stessa con intensità smorzata.

Inizialmente, tramite tecniche di *reverse engineering*, sono state costruite le curve di termoregolazione non lineari, successivamente è stata sintetizzata la formula della temperatura esterna composita. Infine è stato implementato un modello *Simulink* per comparare la logica classica con quella sperimentale delle curve non lineari.

I risultati ottenuti mostrano che il modello sperimentale garantisce un aumento del comfort termico per costanti di tempo tra 10 e 20 ore, impattando sia sul consumo che sull'efficienza energetica.

Questa tesi vuole offrire un contributo significativo alla comprensione e al miglioramento delle tecniche di termoregolazione degli edifici, ponendo solide basi per future ricerche e ulteriori sviluppi in questo campo, nella consapevolezza che la relazione tra la costante di tempo dell'edificio e lo sfasamento termico sia un concetto più

Capitolo 1 Introduzione

complesso che necessita ulteriori approfondimenti.

Capitolo 2

Sistemi HVAC

I sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria vengono comunemente raggruppati in un unico acronimo, HVAC (heating, ventilation and air conditioning). Tuttavia, per funzionare correttamente e per garantire il comfort termico all'interno delle diverse strutture, si basano su diverse tipologie di attrezzature, applicazioni e principi. Le apparecchiature HVAC costituiscono una delle principali fonti di dissipazione di energia elettrica, per questo sono tra i primi elementi da prendere in considerazione in fase di progettazione dell'edificio, sia industriale che residenziale. La realizzazione di impianti HVAC deve garantire elevati standard qualitativi per rispondere alla crescente sensibilizzazione verso le tematiche di risparmio energetico e sostenibilità ambientale, oltre che rispettare le disposizioni delle normative vigenti in materia di efficienza energetica. Un impianto HVAC è un insieme di sistemi complessi, sapientemente progettati, per la gestione del riscaldamento, del condizionamento, della ventilazione dell'aria e anche della refrigerazione, se si fa riferimento nello specifico all'acronimo HVAC-R. Gli impianti HVAC si basano sulla creazione di una serie di apparati e componenti software e hardware che, congiuntamente, consentono di gestire il comfort ambientale di un intero edificio o ambiente circoscritto. Vengono progettati a seconda della tipologia di edificio al quale sono destinati: può essere un sistema di grande dimensione per edifici industriali e commerciali (come fabbriche e aziende) oppure una soluzione per strutture residenziali (quali uffici, alberghi o l'ambiente domestico). In ogni caso, la progettazione è improntata a soddisfare il comfort termico delle persone occupanti, attraverso il riscaldamento o raffreddamento dell'aria, a seconda delle condizioni esterne.

Una delle caratteristiche fondamentali di un impianto HVAC è quella di integrare in un unico sistema il trattamento dell'aria, che altrimenti richiederebbe più "macchine" diverse, come caldaie, ventilatori, purificatori d'aria, pompe di calore, recuperatori, ecc. Il funzionamento di un impianto HVAC si basa quindi sull'interconnessione di vari apparati che insieme forniscono una precisa quantità, qualità, temperatura ed umidità dell'aria nei diversi ambienti di un edificio industriale o residenziale garantendone il giusto comfort termico. Le componenti di un impianto HVAC sono essenzialmente quattro:

- Una macchina termodinamica che fornisce o sottrae (riscaldamento o raffrescamento) il calore all'aria da trattare.

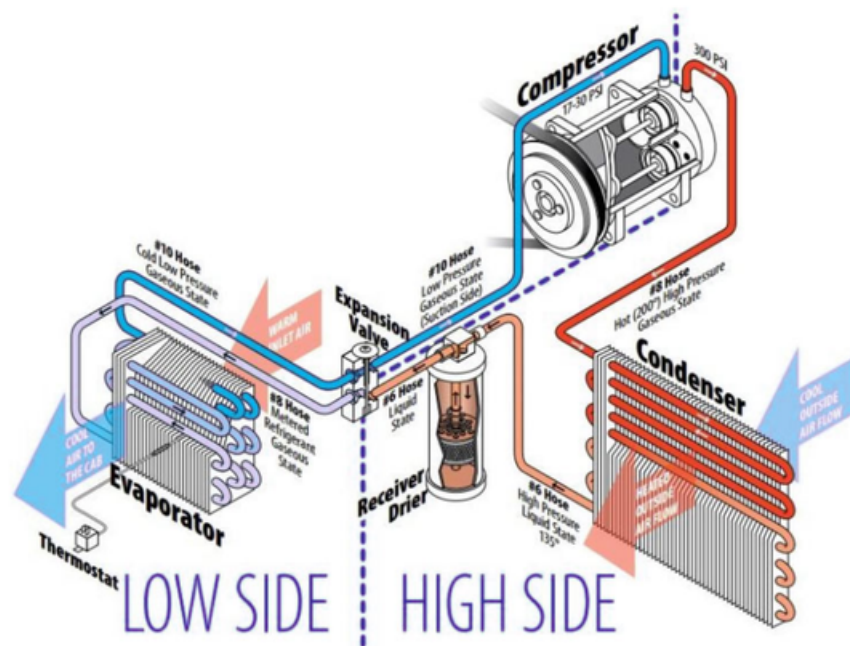


Figura 2.1: Esempio di sistema HVAC

- Un insieme di ventilatori che regolano la quantità di aria in ingresso ed in uscita, solitamente affiancati a sistemi di recupero del calore dell'aria interna prima che venga espulsa.
- Tutte le condutture dei fluidi termovettori e dell'aria che collegano tra di loro i punti di trattamento con gli ambienti da condizionare.
- Un sistema di sensori (termostati, igrometri, rilevatori di Co2, ecc.) che permettono al sistema di adattare il proprio funzionamento alle condizioni effettive degli ambienti.

Tra gli innumerevoli vantaggi che offre un sistema HVAC, i seguenti sono degni di nota:

- Controllo ottimale della temperatura, umidità e qualità dell'aria.
- Ottimizzazione dei consumi energetici: l'alto livello tecnologico li rende molto performanti ed efficienti, ad esempio sfruttando, durante la stagione calda, i momenti in cui l'aria esterna è poco più fredda di quella fissata per gli ambienti interni (free-cooling).

Infine, l'obiettivo principale di un impianto HVAC è garantire il comfort degli ambienti interni. I requisiti di comfort cambiano durante il giorno, di conseguenza, gli impianti sono equipaggiati con sistemi di controllo (in ciclo aperto o ciclo chiuso). Il comfort termico è influenzato da una serie di variabili fisiche, come la temperatura dell'aria, la radiazione termica, l'umidità e la qualità dell'aria.

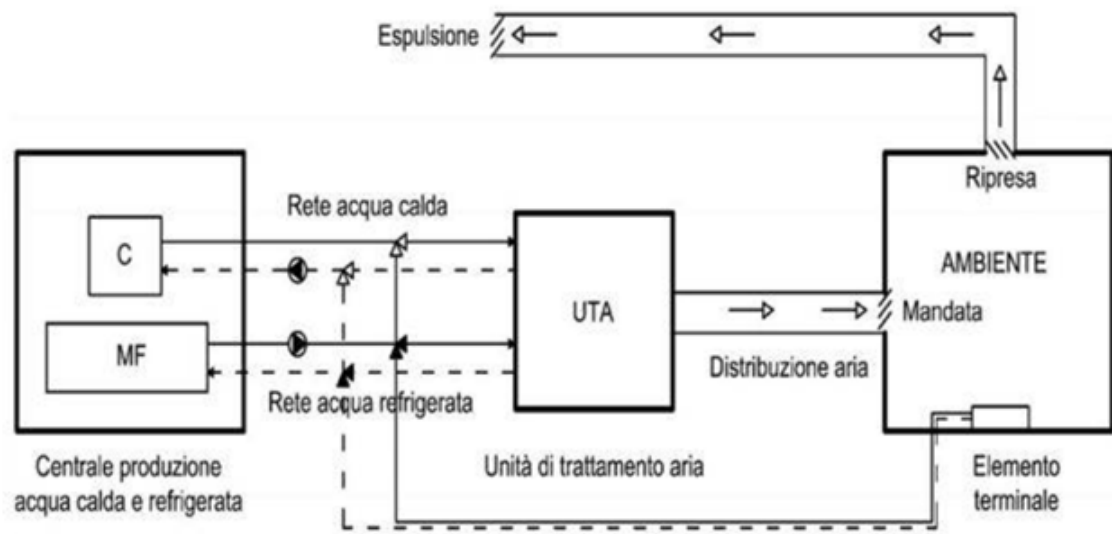


Figura 2.2: Esempio di impianto HVAC misto

2.1 Sistemi di termoregolazione

Il decreto efficienza energetica 102/2014 [8] stabilisce che tutti gli impianti termici a servizio di più unità immobiliari, anche se alimentati da reti di teleriscaldamento, debbano essere dotati di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore. I sistemi di termoregolazione permettono di regolare il funzionamento degli impianti termici (Heating, Ventilation and Air Conditioning) degli edifici, garantendo maggiore flessibilità a seconda delle esigenze degli utenti. I fattori che incidono sulla regolazione dell'impianto e sul comfort percepito all'interno sono le grandezze termoisolometriche, come la temperatura e l'umidità. Ciò significa che al variare della temperatura, si richiede all'impianto un lavoro diverso, sia in caso di riscaldamento che di raffrescamento.

Il compito del sistema di controllo è quello di bilanciare il calore fornito/sottratto all'impianto con le perdite/guadagni termici dell'edificio in ogni istante. Con questa prerogativa, la regolazione permette di conseguire due obiettivi:

1. Il mantenimento di un ambiente termico stabile, entro le condizioni di comfort prefissate (in termini di temperatura e umidità relativa interne, di qualità dell'aria interna, ecc.);
2. La riduzione del consumo di energia primaria, in quanto l'impianto è chiamato ad adeguare la sua potenza al fabbisogno termico istantaneo, senza inutili sprechi, modulando la temperatura o la portata del fluido termovettore.

L'insieme dei dispositivi e delle loro interconnessioni volti al controllo di una variabile di processo prende il nome di “sistema di regolazione automatica”. Esso, per essere definito tale, deve essere composto almeno da:

- Un elemento sensibile (sonda o sensore di misura);
- Un regolatore (ad esempio un termostato);
- Un attuatore o servocomando (ad esempio il motore della valvola o della pompa);
- Un organo finale di regolazione, che comprende il dispositivo controllato (valvola, pompa ecc.) ed il processo (scambiatore di calore, ventilatore ecc.);

I sistemi di termoregolazione lavorano in maniera diversa a seconda che siano automatici o manuali:

- Se il sistema è automatico, tutti i parametri climatici necessari sono rilevati da appositi sensori, che inviano informazioni al sistema e ne determinano la conseguente regolazione;
- Se la regolazione è manuale, gli utenti intervengono direttamente sulle impostazioni di funzionamento;

In ogni caso, i parametri rilevati sono definiti a seconda delle preferenze dell'utente, che definisce dei “set-point”. Il sistema di termoregolazione deve confrontare continuamente la temperatura ambiente con il valore di set-point e di conseguenza far aumentare o diminuire la potenza termica emessa dai corpi scaldanti. Per poter gestire la temperatura, è dunque necessario un termostato collegato ad un meccanismo che confronta la temperatura rilevata con quella dell'intervallo di temperature prestabilito. Se la temperatura rilevata è maggiore, il sistema di riscaldamento si spegnerà, se invece è inferiore il riscaldamento entrerà in funzione per portare l'ambiente alla temperatura desiderata (attivazione della richiesta di calore).

Ci si sofferma ora sulle varie tecniche che permettono di controllare un sistema di termoregolazione, in particolare di regolare la temperatura di mandata dell'acqua che circolerà nell'emettitore dell'impianto (pavimento, termosifoni ecc.). A seconda della gestione di questi componenti, la regolazione può essere a circuito chiuso (“a catena chiusa”, “ad anello chiuso”, “closed loop”); oppure a circuito aperto (“a catena aperta”, “ad anello aperto”, “open loop”). La regolazione a circuito chiuso è così congeniata:

- Il sensore rileva il valore attuale della variabile controllata, inviando la misura al regolatore;
- Il regolatore, ricevuto il valore letto dal sensore e confrontato con quello prefissato (“set-point”), produce un segnale di comando verso l'attuatore, il quale a sua volta opera sul dispositivo controllato;

- L'azione correttiva viene esplicita dal dispositivo controllato sul mezzo di regolazione (acqua, aria, vapore, ecc.);
- Si produce un nuovo valore della variabile controllata, letto ancora una volta dal sensore;
- Il regolatore, ricevuta la nuova lettura, valuta se il proprio intervento è risultato efficace, cioè se il sistema ha risposto nella direzione desiderata (meccanismo di “contro-reaione” o “feedback”); in caso di fallimento di questa verifica, l'errore registrato farà ricominciare l'attività di regolazione.

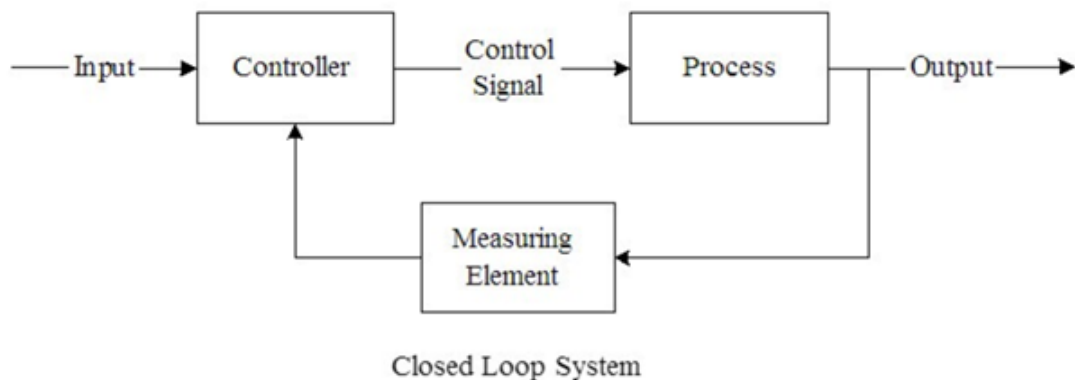


Figura 2.3: Termoregolazione in catena chiusa

Nella regolazione a circuito aperto, invece, l'azione regolante è prodotta sulla base della lettura non della grandezza regolata, ma di una grandezza detta “compensatrice”. Assumendo costante il rapporto tra grandezza regolata e grandezza compensatrice, il regolatore produce la sua azione, ma non avrà alcun riscontro sul fatto che essa sia risultata adeguata, scarsa o eccessiva. Questo tipo di controllo è un processo in cui

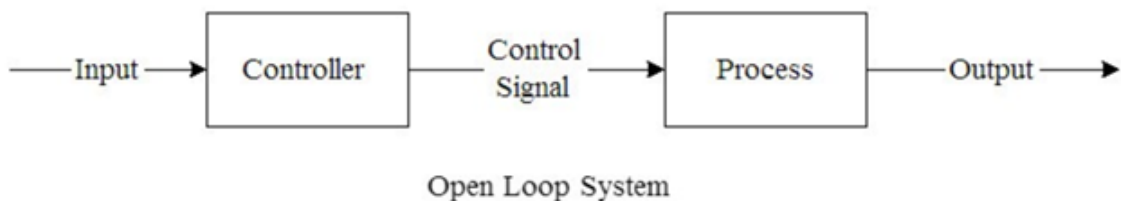


Figura 2.4: Termoregolazione in catena aperta

una o più variabili di ingresso influenzano una o più variabili di uscita secondo una regolarità definita per l'applicazione specifica. Non c'è alcuna retroazione e quindi nessuna azione correttiva. Il sistema di riscaldamento di una stanza, rappresentato nella figura 2.5, è un esempio di controllo in catena aperta. Un meccanismo agisce su una valvola che regola la quantità di calore che deve essere fornita alla stanza in un determinato intervallo di tempo affinché in essa si abbia la temperatura

desiderata (grandezza di riferimento). Una parte del calore, però, fluisce verso l'esterno perché l'isolamento termico delle pareti della stanza non è mai perfetto. La temperatura interna della stanza è determinata dalla differenza tra la quantità di calore fornita al sistema in un determinato intervallo di tempo, così come previsto a causa della presenza della valvola regolatrice, e quella che, nello stesso intervallo di tempo, è dispersa nell'ambiente esterno. A regime, raggiunto l'equilibrio termico, la temperatura all'interno della stanza rimane costante fino a quando la quantità di calore fornita dal radiatore è uguale a quella che fluisce verso l'esterno. È chiaro che in un sistema reale di questo tipo la variabile controllata non può essere valutata con precisione a causa di sopravvenute situazioni e condizioni impreviste: l'invecchiamento dei componenti, eventuali difetti del meccanismo di regolazione e della valvola possono far variare la quantità di calore fornita al sistema. Inoltre è da tener presente che la quantità di calore dispersa nell'ambiente può subire variazioni perché cambia la temperatura esterna o per altri motivi come l'apertura di una finestra, il deterioramento dell'isolamento termico delle pareti, ecc. Queste variazioni, che nel loro insieme costituiscono i disturbi agenti sul sistema, determinano uno scostamento tra temperatura misurata nella stanza e quella fissata preventivamente con il meccanismo di regolazione, sul quale dovrebbe intervenire manualmente un operatore per avere la temperatura desiderata. Da quanto detto si può concludere che un sistema a catena aperta è sensibile alle variazioni del carico, alle variazioni dei parametri del sistema e ai disturbi esterni.

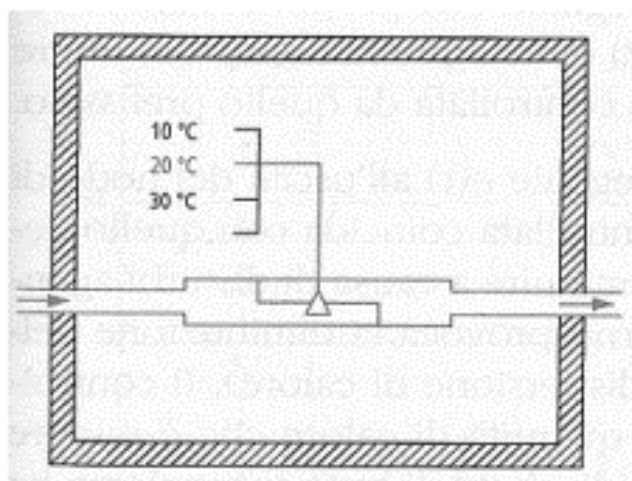


Figura 2.5: Sistema di riscaldamento di una stanza [13]

2.2 Strategie di regolazione per impianti termici

Le strategie di regolazione per impianti termici sono metodi e tecnologie utilizzati per controllare e gestire la temperatura interna di edifici e altre strutture. L'obiettivo

principale di queste strategie è mantenere un ambiente confortevole per gli occupanti, ottimizzando allo stesso tempo l'efficienza energetica e riducendo i costi operativi.

L'adozione di una strategia di regolazione adeguata è essenziale per garantire il comfort termico, ridurre il consumo energetico e minimizzare l'impatto ambientale. Una regolazione efficace può contribuire a ottimizzare l'uso delle risorse energetiche, ridurre le emissioni di gas serra, migliorare la sostenibilità degli edifici e ridurre i costi operativi e di manutenzione.

Possono essere individuate 3 strategie di regolazione per impianti termici principali: la regolazione manuale centrale, la regolazione climatica e la regolazione a punto fisso.

2.2.1 Regolazione manuale centrale

L'ultimo riferimento a questo tipo di regolazione è contenuto nella UNI 10348 del 1993, che è stata sostituita nel 2008 [20]. Le normative attuali (UNI/TS 11300-2 [22] e UNI EN 15316 [21]) non prevedono questo tipo di regolazione per le nuove installazioni. Tuttavia, è comune trovare tali sistemi in impianti esistenti durante le diagnosi energetiche. In questi casi, la regolazione avviene manualmente tramite il termostato della caldaia, che gestisce la temperatura di mandata del fluido termovettore ai terminali dell'impianto.

In un edificio condominiale, questo tipo di regolazione non consente di mantenere costante nel tempo e uniforme nello spazio la temperatura ambiente nei vari alloggi. Per questo motivo, nella determinazione del rendimento di regolazione, la norma UNI/TS 11300-2 [22] raccomanda di ridurre del 5% il valore tabulato per la regolazione climatica dello stesso tipo di terminale. Questa riduzione è correlata al fattore di utilizzazione degli apporti e al rapporto tra apporti e perdite.

2.2.2 Regolazione climatica

Ogni tipo di regolazione è mossa dal principio secondo cui l'energia termica fornita dal generatore debba essere istante per istante fedele al fabbisogno energetico dell'edificio. In prima istanza, si può ritenere questo fabbisogno proporzionale alle sole dispersioni termiche per trasmissione e ventilazione, a loro volta dipendenti dalla temperatura dell'aria esterna. La regolazione climatica individua proprio nella temperatura esterna il parametro più rappresentativo del fabbisogno termico, facendo di essa la grandezza regolante del sistema. La grandezza regolata può essere:

- La temperatura di mandata del fluido termovettore;
- La temperatura media del fluido termovettore;

- La temperatura ambiente;

In letteratura, a seconda della grandezza regolata, si è soliti distinguere:

- “Regolazione climatica”, se la grandezza regolata è la temperatura del fluido termovettore;
- “Compensazione climatica”, se la grandezza regolata è la temperatura ambiente.

Infatti, nel campo dei controlli automatici, quando il valore di set-point di una grandezza (in questo caso la temperatura ambiente) si modifica in base al valore assunto da una seconda variabile (in questo caso la temperatura esterna), si parla di “compensazione” o “azione compensatrice”.

In particolare:

- Si distingue tra compensazione diretta (caso del raffrescamento, quando all’aumentare della temperatura esterna si ha un aumento del valore di set-point della temperatura ambiente) e compensazione inversa (caso del riscaldamento, quando le variazioni hanno segno discorde);
- La legge che lega la temperatura esterna alla grandezza regolata viene denominata “curva/retta climatica” o “curva/retta di compensazione (climatica)”;
- La grandezza regolante (cioè la temperatura esterna) viene detta “grandezza compensatrice”: essa viene letta da un regolatore (detto “master” o “compensatore”) e trasformata in un “segnale compensante”. Quest’ultimo viene poi inviato ad un secondo regolatore (detto “submaster” o “regolatore di base”), collegato all’organo finale di regolazione (valvola a tre vie motorizzata);
- Il rapporto tra variazione della grandezza regolata e variazione della grandezza compensatrice viene definito “autorità di compensazione” e, qualora i regolatori abbiano il medesimo campo, rappresenta graficamente la pendenza della retta climatica (“slope ratio”).

Tuttavia, anche quando la regolazione avviene sulla temperatura del fluido termovettore (media o di mandata) si usa la stessa nomenclatura adottata sopra. Si può tracciare ancora una curva climatica, caratterizzata da:

- Una pendenza fissa, funzione delle caratteristiche di emissione dei terminali di impianto (pannelli radianti, radiatori, ventilconvettori, ecc.), della loro modalità di gestione e del grado di isolamento dell’edificio;
- Una quota fissa se il regolatore opera in circuito aperto, variabile se il regolatore opera in circuito chiuso; se la quota è fissa, è definita dal punto con coordinate temperatura di mandata di progetto – temperatura esterna di progetto.

Il regolatore climatico a circuito aperto consiste in una centralina elettronica digitale, collegata a due sonde di temperatura (una per la mandata dell'impianto e una esterna) e a un servomotore che controlla una valvola a tre vie con funzione di miscelazione. La sonda esterna deve essere installata su una parete esposta a nord o in una posizione ombreggiata, per evitare distorsioni nella lettura dovute alla radiazione solare. La centralina processa il segnale ricevuto dalla sonda esterna e, in base alla curva climatica impostata per l'edificio, calcola la temperatura di mandata ideale, la confronta con il valore effettivo rilevato dalla sonda di mandata e, se necessario, regola la valvola miscelatrice.

Tuttavia, tale controllo risulta inefficace quanto più incidono gli apporti gratuiti (radiazione solare e carichi interni) sul bilancio termico dell'ambiente. L'uso della temperatura esterna come unico parametro rappresentativo è una semplificazione eccessiva per ottenere una regolazione soddisfacente. Il sistema di regolazione climatica, non rilevando la temperatura ambiente, non può considerare gli effetti del soleggiamento, del grado di occupazione e dei vari apporti interni (lampade, computer, ecc.). Questi flussi termici aumentano la temperatura ambiente, causando sovratemperature rispetto al set-point e rischiando di provocare discomfort. In un edificio condominiale, una regolazione centrale di questo tipo non può garantire l'uniformità della temperatura ambiente tra i diversi alloggi, che sono inevitabilmente soggetti ad apporti gratuiti di entità diversa a seconda delle abitudini abitative e dell'orientamento dell'appartamento. Stabilendo una temperatura di mandata come compromesso tra diverse esigenze, alcuni alloggi risulteranno più caldi rispetto al set-point, mentre altri saranno più freddi, generando continui dissidi. Per queste ragioni, la pratica tecnica consente l'installazione di questo tipo di regolazione nei nuovi impianti solo quando gli apporti solari e interni nel mese con maggiore insolazione durante la stagione di riscaldamento sono inferiori al 20% del fabbisogno energetico complessivo dello stesso mese.

Nella figura 2.6 [3] è possibile apprezzare uno schema idraulico che rappresenta un esempio di regolazione climatica, strutturato nel seguente modo:

- Centralina elettronica (1);
- Sonda di temperatura di mandata (2);
- Circuito idraulico per la regolazione della temperatura, tipicamente un circuito di miscelazione dotato di valvola miscelatrice con relativo servomotore (3);
- Sonda di temperatura esterna (4);

La temperatura di mandata si ricava dalla curva climatica in funzione della temperatura esterna, misurata attraverso la relativa sonda. Tale curva viene impostata nella centralina e può normalmente essere modificata a seconda delle esigenze specifiche e del tipo di impianto. La centralina calcola quindi continuamente la temperatura

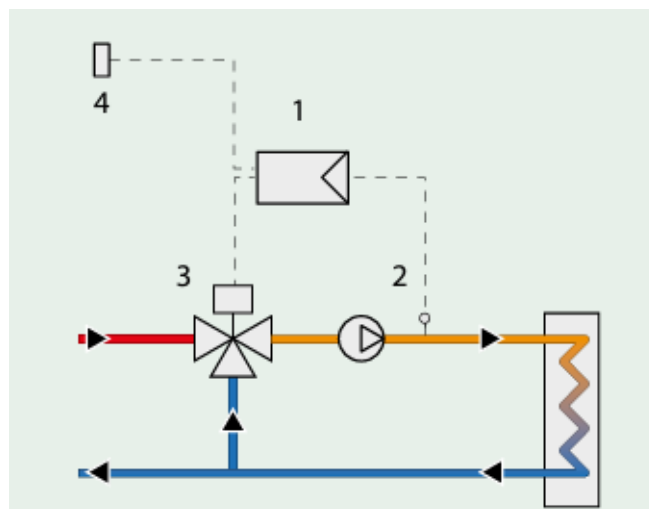


Figura 2.6: Regolazione climatica

di set-point al variare delle effettive condizioni climatiche e regola, di conseguenza, la valvola miscelatrice.

Questa strategia di regolazione riesce a garantire il miglior comfort ambiente adeguandosi costantemente alle condizioni climatiche esterne. Tuttavia va posta particolare attenzione alla programmazione della curva climatica a seconda della tipologia di impianto e soprattutto delle caratteristiche dell'edificio.

Viene tipicamente utilizzata nelle centrali termiche di impianti a radiatori con valvole termostatiche in edifici residenziali, ma anche in impianti a pannelli radianti per rendere più confortevole l'emissione termica.

Il diagramma di regolazione, o "curva climatica", consultabile in figura 2.7 [3], viene costruito a partire dai punti estremi: il valore della temperatura di mandata massimo viene impostato in corrispondenza della minima temperatura esterna e, viceversa, la temperatura di mandata minima corrisponde alla soglia di temperatura esterna per cui non vi è richiesta di potenza termica. La retta che unisce questi due punti rappresenta la curva più semplice, ma spesso si utilizzano anche tratti con diversa pendenza.

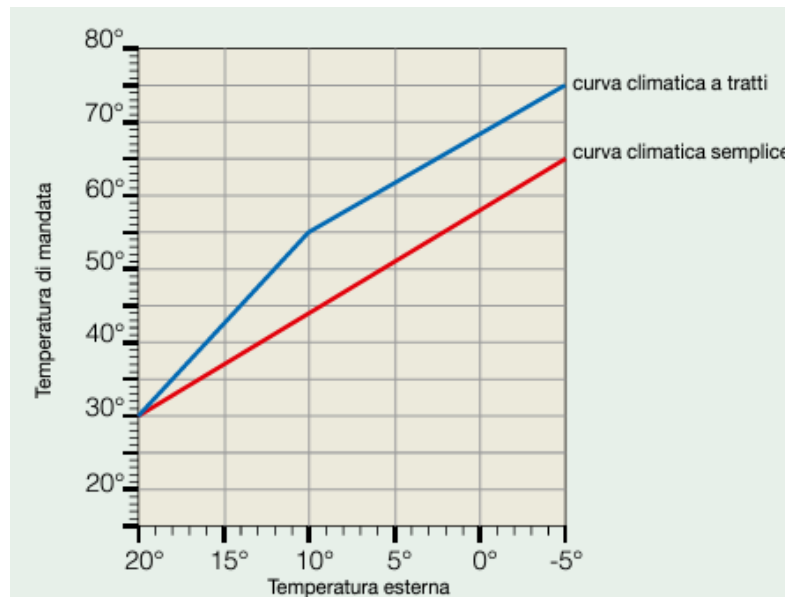


Figura 2.7: Diagramma di regolazione climatica

2.2.3 Regolazione a punto fisso

Questa tipologia di regolazione è perfettamente contrapposta alla logica climatica, in quanto prevede il mantenimento della temperatura di mandata del fluido termovettore ad un valore costante, indipendente dalle condizioni climatiche esterne.

Inizialmente, questo valore veniva settato manualmente dall'utente sulla valvola termostatica, costringendolo a continue azioni di regolazione per adeguarsi alla variabilità delle sollecitazioni termiche agenti sull'edificio. Oggi, invece, la valvola termostatica è tarata sulla temperatura di mandata di progetto (quella massima, in corrispondenza della minima temperatura esterna) e la temperatura ambiente viene mantenuta da termostati di zona o di ambiente, agenti sugli attuatori elettrotermici presenti sulle valvole di zona o sulle testine circuito di distribuzione. La temperatura interna letta dal termostato viene infatti confrontata con quella di set-point impostata e, se superiore, viene disalimentato elettricamente l'attuatore, in modo da mandare in totale chiusura o in parzializzazione il circuito di acqua calda. Quando tutti i circuiti dell'impianto sono in posizione di totale chiusura, un microinterruttore ausiliario comanda lo spegnimento della pompa di circolazione. Mentre la regolazione climatica agisce sulla temperatura del fluido termovettore, la regolazione a punto fisso modifica la portata circolante.

In queste tipologie di impianti assume particolare importanza la scelta del tipo di regolatore cui è collegato il termostato ambiente/di zona: il rendimento di regolazione sarà tanto più elevato spostandosi dal funzionamento on/off a quello proporzionale (P), proporzionale-integrativo (PI) o proporzionale integrativo deriva-

tivo (PID). Approfondimenti sui vari tipi di regolatori sono contenuti al paragrafo 2.3.

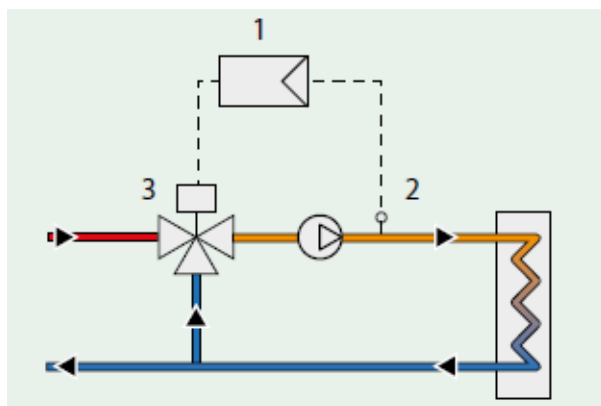


Figura 2.8: Regolazione a punto fisso

In questo caso, il sistema di regolazione [3] è normalmente costituito da:

- Una centralina elettronica (1);
- Una sonda di temperatura di mandata (2);
- Un circuito idraulico per la regolazione della temperatura, tipicamente un circuito di miscelazione dotato di valvola miscelatrice con relativo servomotore (3);

Il valore a cui si vuole mantenere la temperatura di mandata viene impostato direttamente sulla centralina elettronica, la quale comanda il servomotore della valvola miscelatrice con lo scopo di raggiungere e mantenere il set-point. La posizione di regolazione della valvola viene determinata in funzione della temperatura del flusso miscelato, misurata direttamente attraverso l'apposita sonda. In alcuni casi, questo funzionamento può avvenire anche senza dispositivi elettronici, sfruttando valvole dotate di sensori termostatici in grado di comandarne meccanicamente la posizione.

Questa strategia di regolazione presuppone di mantenere la temperatura di mandata dell'acqua ad un valore pari a quello necessario a garantire il comfort termico nel giorno più freddo dell'anno. Trova applicazione in particolare in impianti di piccola taglia a radiatori o a pannelli radianti. Tuttavia, il limite di questa regolazione è costituito dal fatto che la temperatura ambiente continua a cambiare ogni volta che si modificano le condizioni climatiche esterne.

In questo caso il diagramma di regolazione (2.9) [3], che esprime la relazione tra la temperatura esterna e la temperatura di mandata regolata, è caratterizzato da una retta orizzontale.

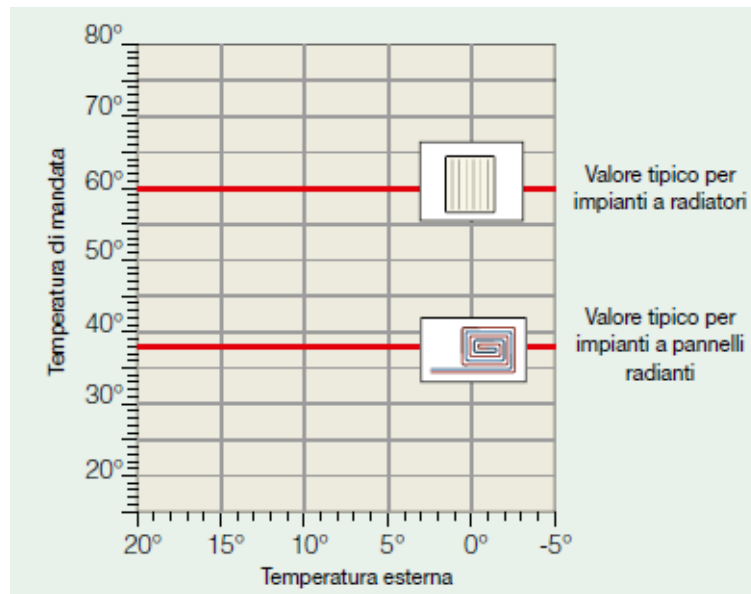


Figura 2.9: Diagramma di regolazione a punto fisso

2.3 Tipologie di regolatore

Negli ultimi decenni, i controlli automatici per i sistemi HVAC hanno subito un notevole sviluppo, passando da un semplice controllo "stand-alone" (un regolatore per ogni variabile di processo controllata) a una sofisticata gerarchia di livelli descritti dall'architettura di controllo. Oggi, possiamo distinguere diversi livelli:

- Livello di campo: coinvolge la regolazione di varie variabili all'interno dell'impianto;
- Livello di automazione: gestisce il coordinamento di più variabili o processi controllati singolarmente a livello di campo;
- Livello di gestione: supervisiona in remoto più impianti, centrali o sotto-centrali, anche situati in edifici diversi e distanti tra loro.

L'integrazione di questi tre livelli di controllo automatico è nota come:

- BAS (Building Automation System) se si limita al monitoraggio dei dispositivi e alla generazione di allarmi;
- BACS (Building Automation Control System) se, oltre al monitoraggio, è in grado di elaborare algoritmi per la regolazione dei dispositivi secondo le logiche programmate.

A volte, si desidera distinguere il sistema di supervisione dell'edificio in base alla sua funzione. Pertanto, non è insolito incontrare gli acronimi seguenti:

- EMS (Energy Management System, per il monitoraggio dei consumi energetici);

- EMCS (Energy Management and Control System, per il monitoraggio e la regolazione dei vari impianti energetici);
- FMCS (Facilities Management and Control System, che integra l'EMCS con altri sistemi di controllo come l'illuminazione, la sicurezza antincendio o gli allarmi).

2.3.1 Regolatore a due posizioni on/off

Si tratta del tipo più semplice di regolazione, che attiva/disattiva un dispositivo a seconda del valore assunto istantaneamente dalla variabile controllata. Ad esempio, se si tratta di un termostato, l'uscita sarà in condizione "on" per temperature ambiente più basse del valore di set-point, in condizione "off" per temperature maggiori. Per evitare che minimi scostamenti attorno al valore impostato inducano inutili interventi del regolatore, dando luogo ad indesiderati pendolamenti ed usura del sistema di regolazione, viene stabilito un differenziale. Esso rappresenta una piccola zona di non-intervento, un campo di insensibilità dell'apparecchio, entro il quale le fluttuazioni della grandezza regolata non provocano lo scatto dei contatti elettrici del regolatore. Il differenziale può essere centrato attorno al valore di set-point, oppure posto tutto al di sopra o al di sotto di esso. Altresì, esso può essere di ampiezza fissa oppure tarabile secondo diverse logiche. Nel gergo dei controlli automatici, si distinguono:

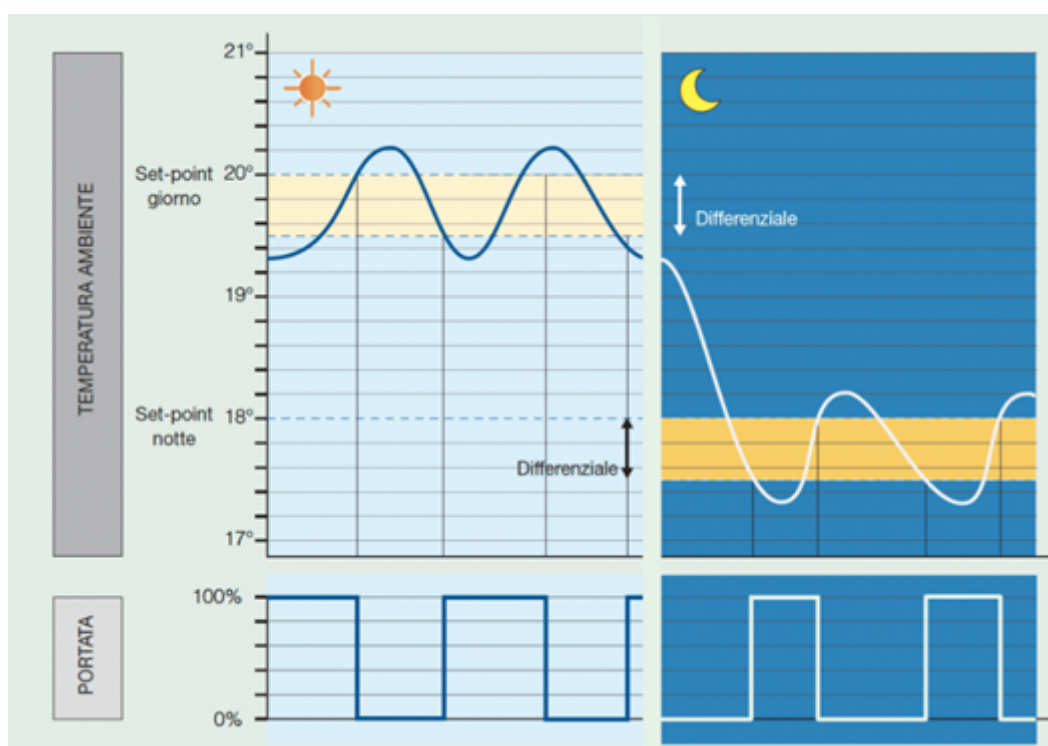


Figura 2.10: Diagramma di regolazione *ON/OFF* [3]

- Il differenziale impostato, la cui definizione è appena stata fornita;

- Il differenziale effettivo, più ampio del precedente, dovuto all'inerzia dell'impianto (shift temporale tra l'istante in cui il regolatore effettua la commutazione e l'istante in cui la variabile controllata rientra nel campo del differenziale impostato); un simile ritardo è pressoché inevitabile: ad esempio, nel caso di un termostato, servirebbe che la velocità di scambio termico fosse molto lenta (dell'ordine degli 0,25 °C/h) affinché non si verificasse questo fenomeno;
- L'overshoot, semi-differenza tra il differenziale effettivo ed il differenziale impostato;
- Lo scostamento, pari a metà del differenziale impostato.

La sua semplicità intrinseca rende questo tipo di regolazione applicabile in diverse tipologie di impianto quali piccoli impianti a radiatori, come quelli delle abitazioni private. Tuttavia non permette una regolazione precisa in sistemi aventi tempi di risposta molto rapidi o frequenti variazioni di carico, quali gli impianti a ventilconvettori. Può invece essere sfruttata in maniera ottimale in sistemi caratterizzati da un'alta inerzia termica, come ad esempio gli impianti a pannelli radianti, dove il termostato di ciascuna zona comanda la completa apertura (ON) o chiusura (OFF) di valvole di zona o di comandi elettrotermici installati su un collettore di distribuzione.

2.3.2 Regolatore proporzionale (P) o modulante

La logica sottesa dal regolatore di tipo modulante è l'adattamento dell'azione regolante prodotta all'errore registrato: tanto più grande è lo scostamento dal valore di set-point, tanto più consistente dev'essere la risposta prodotta. In termini analitici, l'uscita del regolatore (u) è proporzionale all'errore (e) in ingresso, come evidente dalla seguente equazione:

$$u(t) = b + K_p \cdot e(t)$$

dove compaiono i due parametri caratteristici del regolatore proporzionale:

- Il guadagno proporzionale (o "costante proporzionale" o "coefficiente dell'azione proporzionale") K_p ;
- Il *bias* (o "*reset*") b , utile se si vuole ottenere un'uscita non nulla quando l'errore è zero.

Il legame tra uscita ed errore può essere espresso alternativamente per mezzo della banda proporzionale B_p , come riportato nella seguente equazione:

$$u(t) = b + \frac{100}{B_p} \cdot e(t)$$

in cui è evidente il legame tra banda proporzionale e guadagno proporzionale:

$$B_p = \frac{100}{K_p}$$

La relazione è valida qualora il guadagno K_p sia espresso in funzione del rapporto tra i segnali di ingresso ed uscita al regolatore, normalizzati ai rispettivi valori di fondo scala:

$$K_p = \frac{u(t)/u_{\text{fondoscala}}}{e(t)/e_{\text{fondoscala}}} - b$$

In termini più pratici, la banda proporzionale è quella minima variazione della grandezza regolata (“errore”) che è in grado di produrre, nell’organo finale di regolazione, il passaggio dalla posizione di totale chiusura a quella di totale apertura (o viceversa). Il suo valore può essere espresso in termini dimensionali (l’unità di misura è la stessa della variabile di controllo) oppure in termini percentuali, rapportandola al campo di misura del controllore in questione.

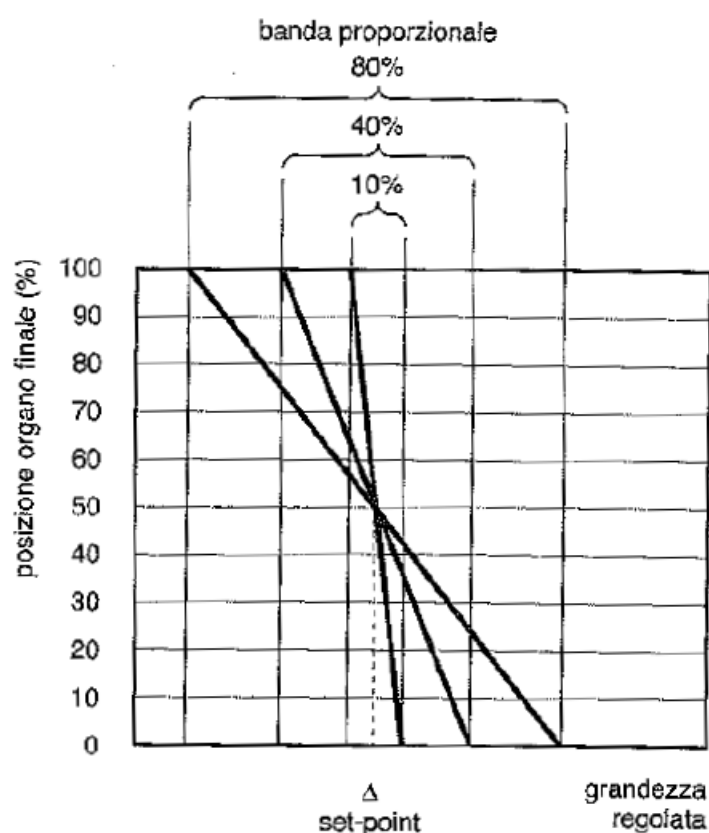


Figura 2.11: Regolazione grandezza

Il problema più gravoso di questo tipo di regolazione è noto come “*off-set*” o “errore di regime permanente”: si tratta dello scostamento a regime dal valore di *set-point*. Questo errore caratteristico si presenta ogni qual volta la perturbazione applicata al sistema sia permanente. Se invece la variazione di carico è transitoria, il regolatore proporzionale riesce a svolgere perfettamente la sua funzione.

L’*off-set* può essere ridotto aumentando il guadagno (ossia riducendo l’ampiezza della banda proporzionale), accettando però una dilatazione dei tempi richiesti per

arrivare a regime. Questo intervento si rende spesso necessario per rendere il sistema più sensibile, quando si ha l'impressione che la grandezza regolata stia sfuggendo al controllo: diminuire la banda proporzionale, infatti, significa che basterà una minor variazione dell'errore in ingresso al regolatore per ottenere un significativo cambiamento del segnale di comando in uscita. Insomma, più alto è il guadagno (più bassa è la banda proporzionale), maggiori sono la precisione e la reattività del regolatore, ma minore è la capacità di giungere velocemente a convergenza. La scarsa stabilità di un regolatore con alto guadagno è rappresentata dai caratteristici pendolamenti iniziali che caratterizzano la risposta. Qualora il processo sotto controllo fosse caratterizzato da rapidi transitori, le oscillazioni nella risposta si farebbero altrettanto veloci ed il sistema tarderebbe perciò a stabilizzarsi. In questo caso è necessario ridurre il guadagno, ossia ampliare la banda proporzionale, accettando un incremento dello scostamento permanente. Questa azione è necessaria anche quando si è realizzato un incremento indebito del guadagno, tale da rendere il regolatore tanto sensibile da intervenire anche a fronte di piccole perturbazioni ("rumori di misura").

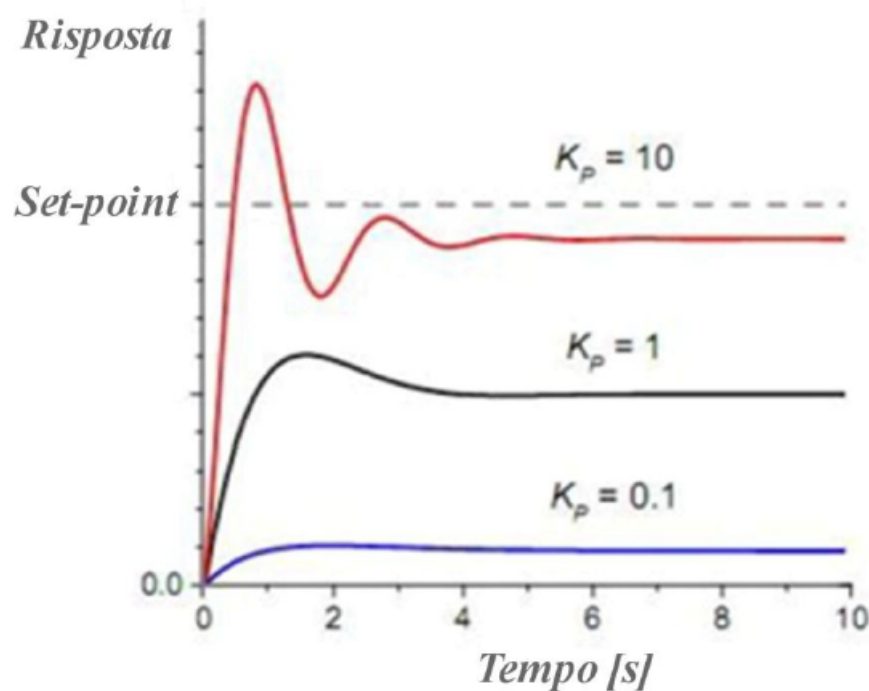


Figura 2.12: Risposta del sistema al variare del coefficiente K_p [14]

Un modo alternativo per cercare di annullare l'off-set è scegliere un valore appropriato del bias b , tale da produrre un'azione regolante $u(t)$ non esclusivamente dipendente dall'errore $e(t)$.

Da un punto di vista meccanico, l'azione regolante di un controllore di tipo P

fa sì che la posizione dell'organo finale di regolazione lungo la propria corsa risulti proporzionale all'errore rilevato. Ciò significa che tutto il campo d'azione del dispositivo finale può essere sfruttato per inseguire la variabile controllata. In base al segnale di comando prodotto in uscita, è d'uso comune operare la seguente distinzione tra regolatori:

- Ad azione diretta: all'aumento della variabile di controllo corrisponde un incremento della risposta del regolatore (caso del raffrescamento);
- Ad azione inversa: all'aumento della variabile di controllo corrisponde un decremento della risposta del regolatore (caso del riscaldamento).

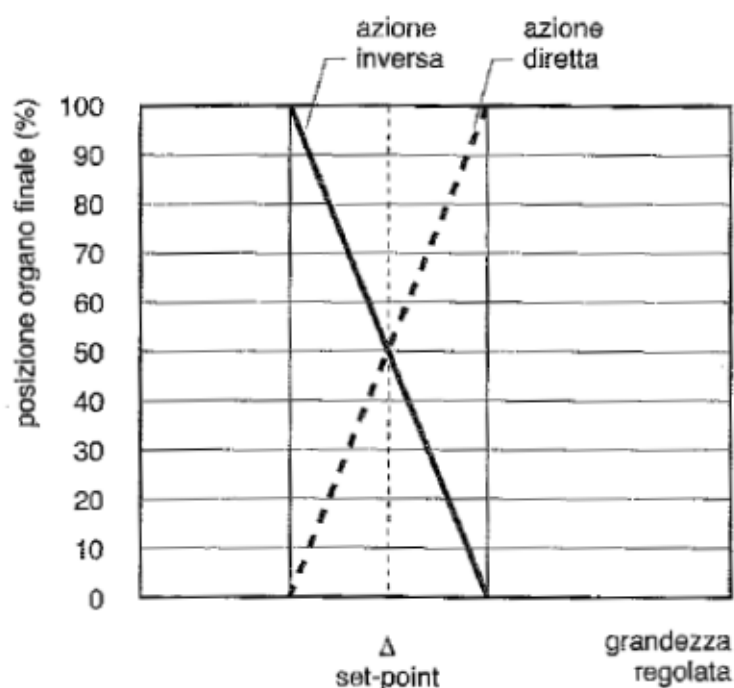


Figura 2.13: Regolatori ad azione diretta/inversa

L'associazione del tipo di azione al periodo estivo o invernale è valida solo sotto l'ipotesi di organi finali di regolazione del tipo NC (normalmente chiusi): supponendo il caso di valvole (a due o tre vie), esse saranno in totale chiusura quando il segnale di comando risulta nullo, intercettando la portata di fluido termovettore.

In conclusione, il blocco proporzionale risulta molto utile se l'obiettivo è quello di inseguire il più velocemente possibile il segnale di riferimento (set-point), accontentandosi tuttavia di non raggiungerlo mai perfettamente. Nonostante l'entità dello scostamento non crei problemi nella maggior parte degli impianti HVAC, qualora esso non potesse essere accettato o venisse giudicato eccessivo, bisognerebbe:

- Aumentare il guadagno, verificando la stabilità del sistema da anello chiuso (*criterio di Routh o diagramma di Nyquist*);
- Adattare il valore del bias ("reset");
- Introdurre un'azione integrale nel regolatore;

2.3.3 Regolatore proporzionale integrale (PI)

L'evoluzione nel campo dei controlli automatici ha suggerito la sovrapposizione di un'azione integrale a quella proporzionale, con l'intento di eliminare definitivamente il problema dell'off-set in occasione di variazioni di carico permanenti. La logica di intervento è la seguente: una volta stabilito un intervallo di tempo opportuno ("tempo di integrazione"), se entro questo periodo la variabile regolata non riesce a raggiungere il valore di set-point grazie alla sola azione proporzionale, il regolatore invia un ulteriore segnale, di valore uguale a quello iniziale, allo scopo di eliminare ogni scostamento. L'off-set viene annullato ripetendo la correzione puramente proporzionale in un arco di tempo prefissato. Questo tipo di regolazione si ottiene tramite la programmazione di un controllore elettronico, che permetta di memorizzare l'andamento temporale della variabile controllata e di elaborare un segnale di comando sulla scorta della serie di dati memorizzata. In termini analitici, l'azione integrale può essere espressa nella seguente forma:

$$u(t) = K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

dove K_I è noto come "guadagno integrale" o "coefficiente dell'azione integrale". Come si può notare, la componente integrale dell'uscita è proporzionale all'integrale dell'errore $e(t)$, e perciò al suo valor medio. Sommando questo contributo con quello proporzionale (senza il bias, ora superfluo), discende l'espressione dell'uscita del regolatore:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \right]$$

dove compare il parametro caratteristico dell'azione integrale: il tempo di integrazione T_I , a volte designato come "tempo integrale" T_N o "tempo di reset".

Esso viene definito come il rapporto tra i coefficienti dell'azione proporzionale e dell'azione integrale:

$$T_I = \frac{K_p}{K_I}$$

Esattamente come la banda proporzionale è inversamente proporzionale a K_p nei regolatori di tipo P, qui è il tempo di integrazione ad essere inversamente proporzionale a K_I .

Alcuni regolatori PI offrono la possibilità di tarare la banda proporzionale e il

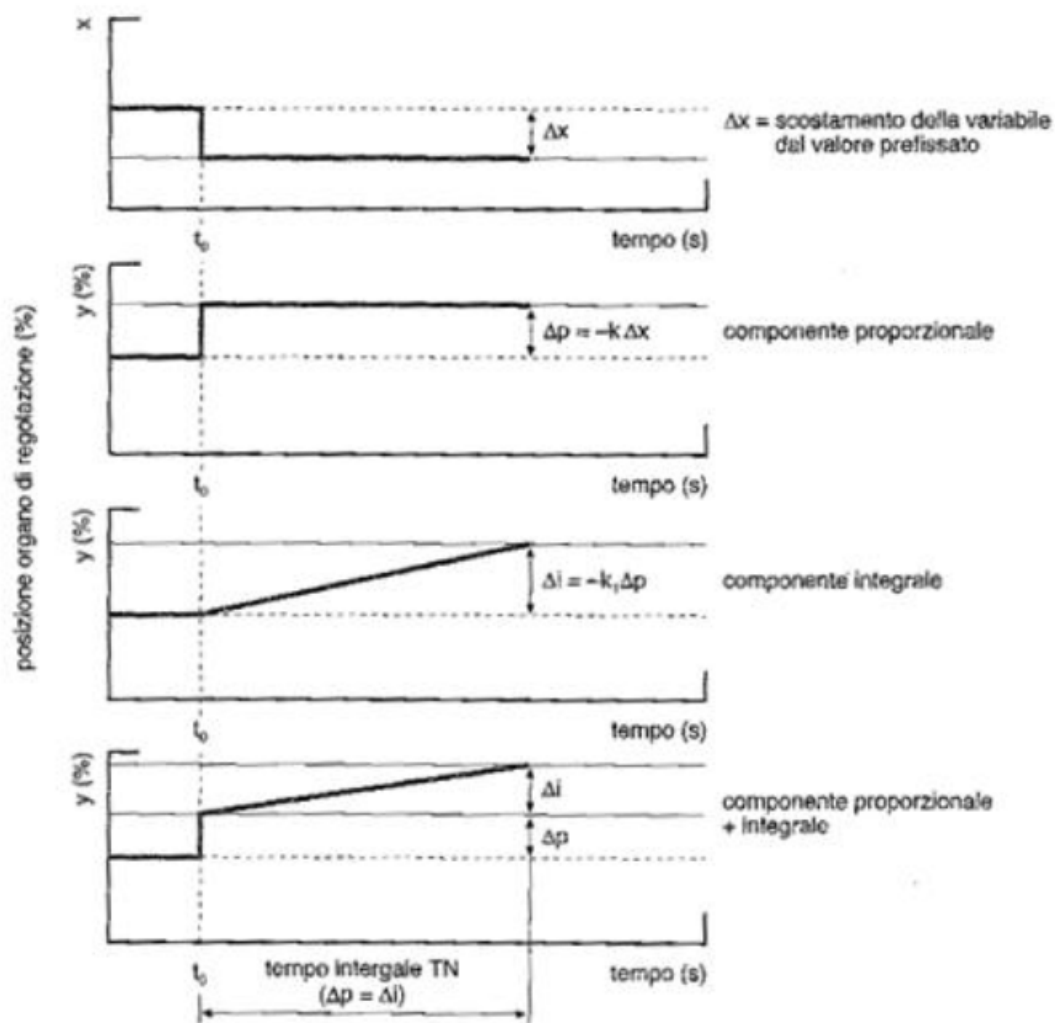


Figura 2.14: Approccio proporzionale integrale

tempo di integrazione: il loro settaggio non è tuttavia indipendente, in quanto tra di loro vige una relazione di inversa proporzionalità. Allo scopo di attribuire al regolatore l'azione integrale più appropriata per centrare gli obiettivi di precisione e di stabilità, si procede per passi:

- Si porta la banda proporzionale al valore minimo, per massimizzare la precisione e la reattività del regolatore;
- Si porta il tempo di integrazione al valore massimo;
- Si imposta sul regolatore il valore di set-point per la variabile regolata;
- Si mette in funzione l'impianto, esaminando la risposta del regolatore: qualora presenti delle pendolazioni, si provvede ad aumentare la banda proporzionale fino, e non oltre, alla loro scomparsa;

- Si diminuisce il tempo di integrazione fino a non incorrere nuovamente nella comparsa delle oscillazioni.

Infatti, diminuire il tempo di integrazione T_I (aumentare K_I a parità di K_p) significa attribuire maggiore importanza all'azione integrale: l'integrale dell'errore salirà più rapidamente verso il valore di set-point. Tuttavia, questa velocità di salita viene pagata con una sovra-elongazione della risposta rispetto al set-point (figura 2.15) e con l'imposizione al sistema di una serie oscillazioni, tanto più ampie quanto più è stato ridotto il tempo di integrazione T_I .

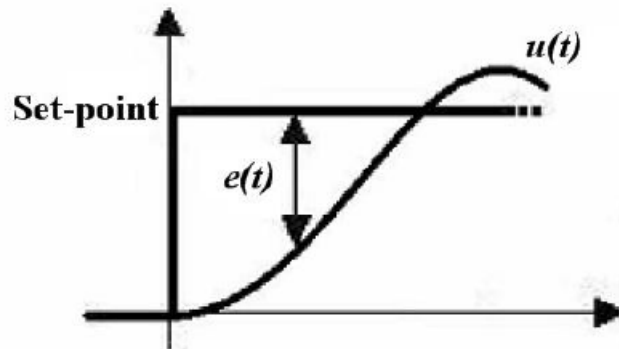


Figura 2.15: Sovra-elongazione della risposta in un regolatore PI

Esse richiedono tempo prima di stabilizzarsi ed il sistema, pertanto, nonostante la caratteristica reattività al transitorio, arriverà più lentamente a regime. Valori più elevati di T_I stabilizzano prima il sistema, tuttavia conducono ad un progressivo indebolimento del contributo integrale: al limite, se il tempo di integrazione fosse infinito, il regolatore si ridurrebbe ad un proporzionale puro. Nonostante all'apparenza questo tipo di regolatore coniughi i vantaggi di entrambi i tipi di controllo ed elimini il problema dell'off-set, permane una debolezza: nelle situazioni limite (ad esempio nel caso di valvola tutta aperta o tutta chiusa), l'errore non è mai nullo. Questo comporta il persistere dell'azione integrale, accusando il regolatore di favorire l'instabilità del sistema. Il fenomeno è noto in letteratura come “wind-up”. I moderni regolatori PI devono essere dotati di logiche di limitazione nei riguardi di questa problematica.

Altro difetto di questo tipo di regolatore, se analizzato mediante le trasformate di Laplace, è l'introduzione di uno sfasamento di 90° in ritardo della risposta. Principale conseguenza, è il peggioramento dei margini di stabilità del sistema ad anello chiuso, che costringe a lavorare con guadagni integrali K_I piuttosto contenuti.

In conclusione, scegliere con senno i guadagni integrale K_I e proporzionale K_p per preservare la stabilità del sistema risulta la premessa inamovibile per validare la funzionalità di un regolatore di tipo PI: la velocità di risposta alle variazioni di sollecitazione (tipica del regolatore proporzionale) e la precisione nella risposta a regime (tipica del regolatore integrale).

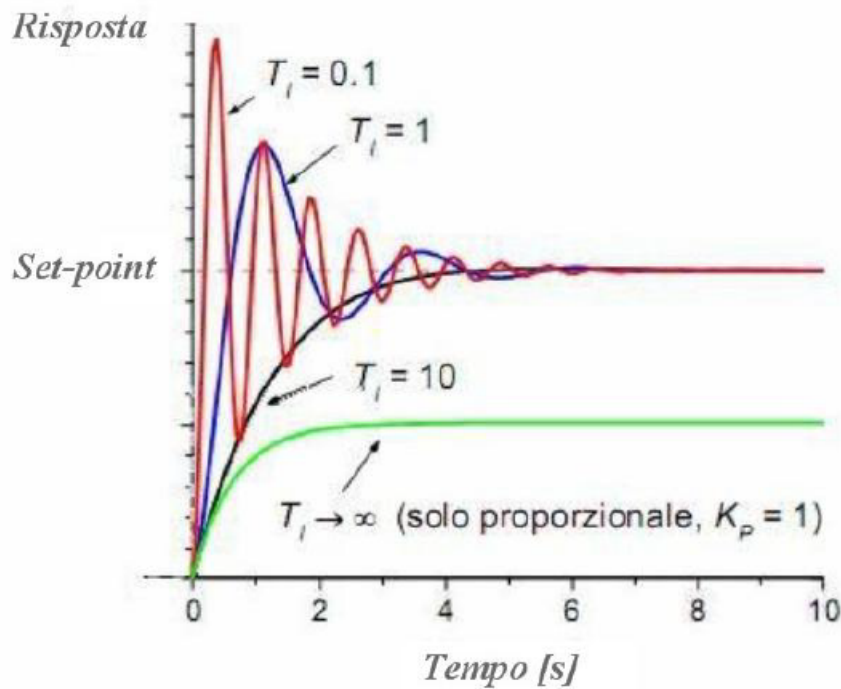


Figura 2.16: Risposta in un regolatore PI [14]

2.3.4 Regolatore Proporzionale Integrale Derivativo (PID)

L'evoluzione finale dei regolatori standard tempo-invarianti è incarnata dal regolatore PID. Questo dispositivo integra, oltre alle funzioni proporzionale e integrale già discusse, una componente aggiuntiva di tipo derivativo. La funzione derivativa è particolarmente efficace nel controllo dei transitori, poiché intervenendo sul parametro ad essa associato (noto come "tempo derivativo"), è possibile modulare la velocità di risposta del sistema, accelerandola o rallentandola. Tale caratteristica risulta di grande utilità in quei sistemi caratterizzati da elevata inerzia termica, dove le variazioni della variabile controllata avvengono in modo graduale. Analiticamente, l'azione derivativa può essere descritta mediante la seguente equazione:

$$u(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Dove K_D è noto come "guadagno derivativo" o "coefficiente dell'azione derivativa". Si nota quindi come la risposta prodotta sia proporzionale alla velocità di variazione dello scostamento tra valore attuale e valore di set-point della variabile controllata.

Sommando questo contributo con quello proporzionale, si ricava l'espressione dell'u-

scita del regolatore PID:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

dove è evidente il parametro caratteristico dell'azione derivativa, ossia il tempo derivativo (o “tempo di azione derivativa”), così definito:

$$T_D = \frac{K_D}{K_p}$$

Ai fini pratici, il tempo derivativo rappresenta il periodo necessario affinché la sola azione proporzionale produca un segnale di comando equivalente a quello generato dall'azione derivativa. Dall'equazione funzionale del regolatore PID, si evince che esso produce un segnale di comando basandosi su tre informazioni distinte:

- la deviazione tra il valore attuale della grandezza regolata e il valore prefissato (azione proporzionale);
- l'entità e la durata di tale deviazione (azione integrale);
- la velocità di variazione di questa deviazione (azione derivativa);

Il principale beneficio dell'azione derivativa consiste nel contenimento degli overshoots (positivi o negativi) rispetto al set-point, particolarmente rilevante durante il transitorio iniziale. Questo beneficio deriva dall'introduzione del gradiente temporale dell'errore, che consente di valutare la tendenza evolutiva della variabile controllata. In tal modo, il regolatore acquisisce una capacità “predittiva”, e il contributo derivativo viene spesso definito come “anticipo”. Tuttavia, l'azione derivativa non interviene nell'eliminazione dell'errore, ma piuttosto stabilizza le operazioni di controllo, soprattutto in sistemi soggetti a variazioni di carico improvvise o a ritardi significativi.

I regolatori PID attuali, utilizzati nei sistemi HVAC, sono digitali e dotati di microprocessori elettronici che implementano l'algoritmo. Spesso, questi regolatori dispongono della funzione di “auto-tuning”, che consente la taratura automatica dei tre parametri di controllo (proporzionale, integrativo e derivativo), permettendo al regolatore di adattarsi in modo ottimale al processo da controllare.

I vantaggi dei regolatori PID possono essere riassunti come segue:

- Combinano le tre azioni di controllo standard e i relativi benefici, con un costo aggiuntivo minimo rispetto, ad esempio, ai regolatori PI;
- Sono semplici da realizzare in diverse tecnologie (elettronica, idraulica, pneumatica);
- Sono efficaci nel controllo di un'ampia gamma di processi industriali, motivo per cui sono spesso definiti “regolatori industriali”;

- Sono adatti a controllare processi per i quali è difficile trovare un modello fisico-matematico semplice ma rappresentativo;
- Sono dispositivi standardizzati, quindi affidabili ed economici;
- Sono facili da tarare, sia manualmente (tramite manopole o software) che automaticamente;
- Rappresentano un giusto compromesso tra efficacia e costo complessivo (progettazione, produzione e manutenzione).

Queste caratteristiche hanno reso il PID, nelle sue numerose varianti, il sistema di controllo più diffuso, con una gestione stimata del 95% degli anelli di regolazione presenti negli impianti.

2.4 Generatori di calore in impianti di riscaldamento

Secondo l'ultima definizione introdotta dal decreto legislativo 48/2020 [24] che ha modificato il D.lgs. 192/05 [23] un impianto termico è un impianto tecnologico fisso destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, o destinato alla sola produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione, accumulo e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolazione e controllo, eventualmente combinato con impianti di ventilazione. Non sono considerati impianti termici i sistemi dedicati esclusivamente alla produzione di acqua calda sanitaria al servizio di singole unità immobiliari ad uso residenziale ed assimilate.

Come indicato dalla normativa, con impianto termico, si fa riferimento sia alla climatizzazione invernale sia a quella estiva. L'impianto di riscaldamento quindi, è un impianto termico destinato alla produzione di calore per la climatizzazione invernale.

Un impianto di riscaldamento è caratterizzato dai seguenti elementi chiave:

1. **Generatore di calore:** I generatori di calore per impianto di riscaldamento sono dispositivi progettati per produrre calore e distribuirlo all'interno degli ambienti domestici o industriali, al fine di garantire un adeguato livello di comfort termico. Questi generatori possono essere alimentati con diversi tipi di combustibili, tra cui gas metano, GPL, gasolio o biomasse. In base al combustibile utilizzato, il funzionamento del generatore può variare notevolmente. In generale, i generatori di calore possono essere suddivisi in due categorie principali: quelli a combustione e quelli elettrici. I generatori a combustione utilizzano un combustibile per produrre calore, mentre quelli elettrici utilizzano l'energia elettrica per generare (o trasportare) calore.

2. Rete di distribuzione dell'impianto di riscaldamento domestico: è composta dalla tubazione che ha il compito di veicolare l'acqua calda riscaldata dal generatore ai terminali di riscaldamento presenti negli ambienti da riscaldare. La scelta del tipo di tubazione da utilizzare dipende principalmente dal tipo di impianto e dalle esigenze dell'utente. Attualmente, i materiali più comuni per la realizzazione delle tubazioni sono il rame, l'acciaio, il polipropilene e il PEX (polietilene reticolato ad alta densità). Le tubazioni in rame sono le più utilizzate in ambito domestico grazie alla loro resistenza e alla loro durata nel tempo. Tuttavia, il costo del materiale e della sua installazione può essere elevato rispetto ad altri materiali. Questa tipologia di tubazione grazie alle sue caratteristiche fisiche garantisce una lunga durata e minime manutenzioni. Le tubazioni in acciaio sono comunemente utilizzate in impianti di grandi dimensioni, come quelli ad uso industriale, grazie alla loro resistenza meccanica e alla loro capacità di sopportare pressioni elevate. Le tubazioni in polipropilene e in PEX, invece, sono molto utilizzate in impianti di riscaldamento a pavimento grazie alla loro elevata flessibilità e facilità di installazione.
3. Terminali: I terminali di un impianto di riscaldamento domestico sono i dispositivi che hanno il compito di distribuire il calore all'interno degli ambienti da riscaldare. Esistono diverse tipologie di terminali, ognuna delle quali presenta caratteristiche specifiche in termini di efficienza, comfort e design.
 - I termosifoni (o radiatori) sono i terminali più comuni negli impianti di riscaldamento domestico. Essi sono costituiti da un corpo in acciaio, ghisa o alluminio, al cui interno circola l'acqua calda proveniente dal generatore di calore;
 - L'impianto a pavimento è un sistema di riscaldamento a bassa temperatura (compresa tra i 35 °C e i 38 °C) che prevede l'installazione di una serie di tubi sottili posti sotto il pavimento e attraverso i quali circola l'acqua calda;
 - I fancoil (ventilconvettori) sono terminali di riscaldamento e raffreddamento che utilizzano un ventilatore per convogliare l'aria all'interno dell'ambiente. Il calore viene distribuito attraverso uno scambiatore di calore a batteria, il quale è alimentato dall'acqua calda proveniente dal generatore di calore;

Dopo aver delineato le caratteristiche basilari dei sistemi di riscaldamento utilizzati nelle abitazioni moderne, si passa all'approfondimento di due tipologie di generatore di calore che figurano tra le più ricorrenti al giorno d'oggi: le caldaie e le pompe di calore.

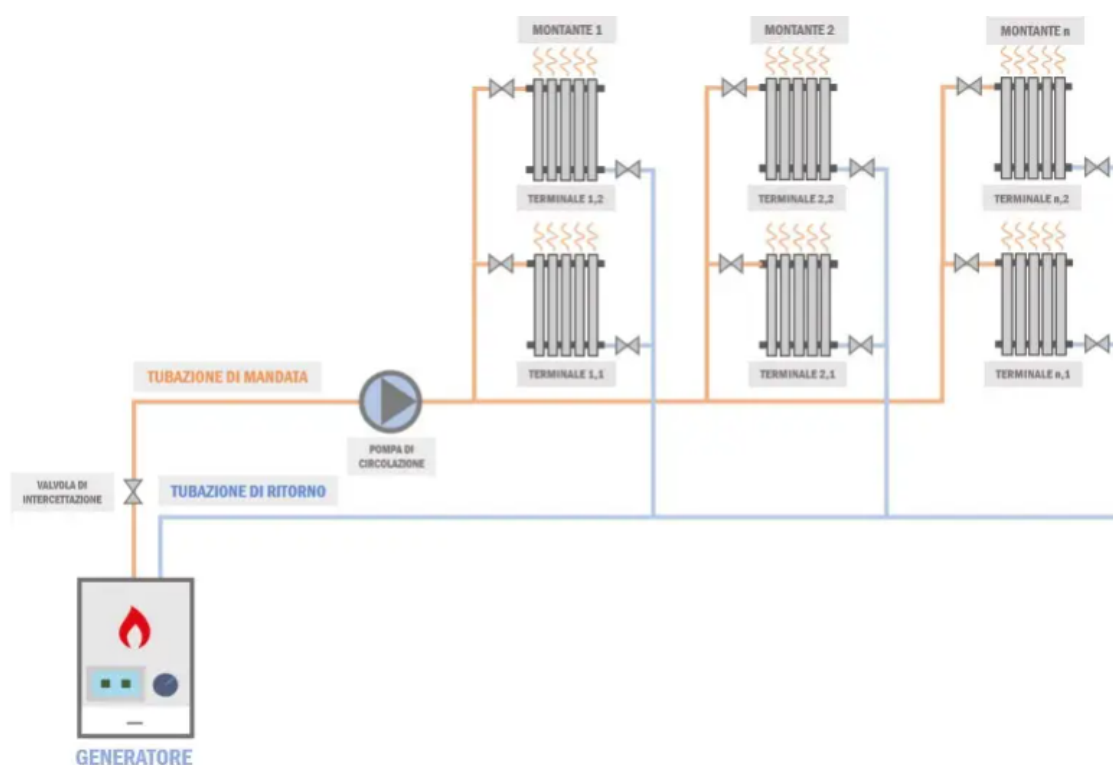


Figura 2.17: Tipico impianto di riscaldamento [16]

2.4.1 Caldaia a condensazione

La caldaia a condensazione è un tipo di generatore progettato per generare calore mediante la combustione di combustibili fossili, come il gas metano o il GPL, al fine di surriscaldare l'acqua utilizzata nei sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

Per comprendere appieno il funzionamento della caldaia a condensazione e i benefici che comporta, è essenziale analizzare il processo attraverso il quale opera. Il funzionamento di una caldaia a condensazione può essere suddiviso in 4 step:

1. Generazione di calore attraverso la combustione: il processo di funzionamento di una caldaia a condensazione inizia con la combustione di un combustibile fossile, tipicamente gas metano o GPL. Questa combustione è gestita da un bruciatore all'interno della caldaia. Durante questa fase, viene generato un flusso di calore che ha lo scopo di riscaldare l'acqua all'interno del sistema;
2. Condensazione del vapore acqueo: durante la combustione, insieme al calore, viene prodotto anche vapore acqueo. Nei sistemi tradizionali, questo vapore verrebbe semplicemente rilasciato nell'atmosfera attraverso i fumi di scarico. Tuttavia, nella caldaia a condensazione, una parte fondamentale del processo è il raffreddamento di questi fumi. Quando il vapore acqueo si raffredda a una

2.4 Generatori di calore in impianti di riscaldamento

certa temperatura, raggiunge il punto di rugiada, diventando liquido. Questo è ciò che si intende per condensazione;

3. Recupero dell'energia latente: il passo successivo comporta il recupero dell'energia termica latente contenuta nel vapore condensato. Questa preziosa energia viene quindi indirizzata verso uno scambiatore di calore dedicato all'interno della caldaia. Qui, l'energia recuperata viene utilizzata per riscaldare ulteriormente l'acqua destinata al sistema di riscaldamento dell'edificio o per la produzione di acqua calda per uso domestico;

4. Distribuzione del calore: una volta che l'acqua è stata riscaldata grazie all'energia termica recuperata, viene distribuita in tutto l'edificio. Questo avviene tramite un circolatore integrato nella caldaia, il quale spinge l'acqua calda attraverso il sistema di riscaldamento dell'edificio. Questa acqua calda è, quindi, pronta per essere utilizzata per riscaldare gli ambienti interni o per la produzione di acqua calda per scopi igienici.

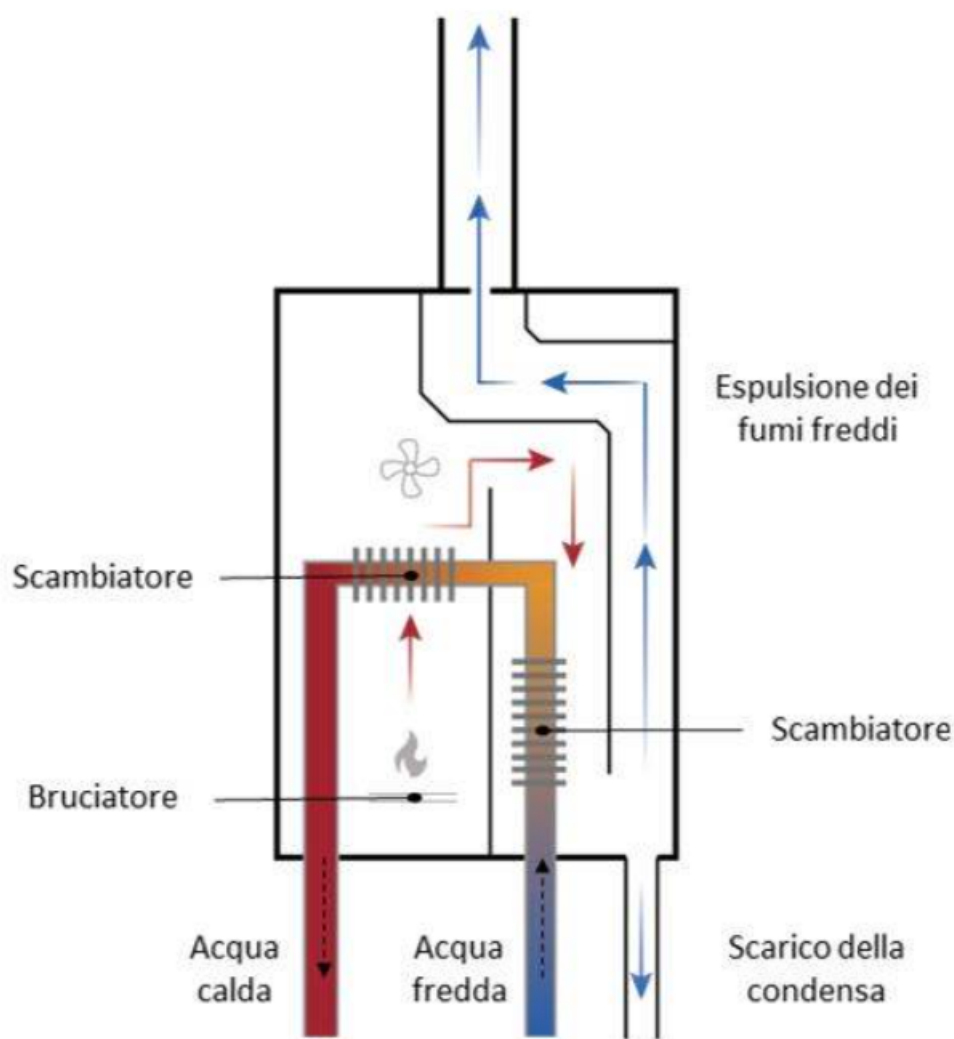


Figura 2.18: Schema di funzionamento di una caldaia a condensazione

Le caldaie a condensazione si distinguono notevolmente dalle caldaie tradizionali grazie alla loro capacità di recuperare e sfruttare il calore residuo. Nei modelli tradizionali di caldaie gran parte del calore prodotto durante la combustione del combustibile fossile, come il gas, viene disperso attraverso i fumi di scarico. Questo calore latente viene disperso nell'ambiente e non viene sfruttato in modo efficiente. Di conseguenza, il vapore acqueo prodotto durante il processo di combustione può condensare all'interno del sistema di scarico senza fornire alcun vantaggio termico.

Le caldaie a condensazione, al contrario, sono progettate per massimizzare l'efficienza energetica sfruttando appieno il calore latente. In queste caldaie, il vapore acqueo presente nei fumi di scarico viene raffreddato al punto di rugiada, trasformando così il vapore in condensa, ovvero acqua liquida. Questo processo rilascia energia latente (energia termica recuperata dall'acqua di condensa) che viene utilizzata per riscaldare ulteriormente l'acqua destinata al sistema di riscaldamento o alla

produzione di acqua calda sanitaria.

2.4.2 Pompa di calore

La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire calore da un ambiente a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta. Spesso si tende a considerare il solo concetto di pompa di calore per acqua calda, ma in realtà questa macchina ha un funzionamento più ampio. Oltre al riscaldamento invernale e alla fornitura di acqua calda a uso sanitario, infatti, invertendo il ciclo garantisce anche il raffrescamento degli ambienti.

Il principio di funzionamento della pompa di calore si basa sul fenomeno dell'espansione Joule-Thomson di un fluido refrigerante molto freddo ma che vaporizza a basse temperature. Tale fluido, compiendo dei cicli di compressione ed espansione, permette alla pompa di calore di trasferire calore all'acqua calda sanitaria.

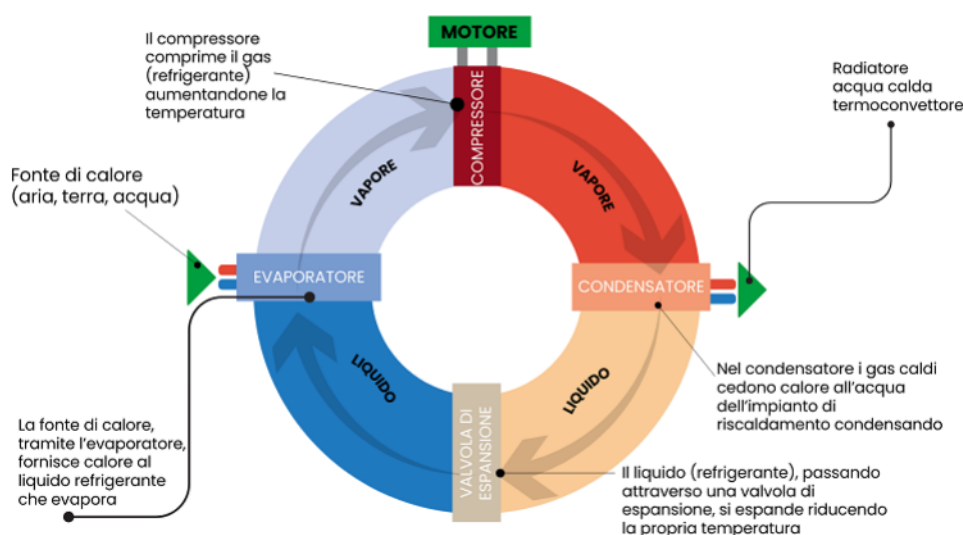


Figura 2.19: Schema di funzionamento di una pompa di calore

Per riscaldare l'ambiente, la pompa di calore estrae il calore da una fonte naturale (come l'aria, l'acqua o il terreno) lo porta alla temperatura desiderata e lo trasporta all'interno dell'edificio dove verrà irradiato nell'ambiente per mezzo di impianti radianti a pavimento o terminali come termosifoni o fancoil.

In sostanza, un funzionamento simile, ma opposto, a quello del frigorifero. Quest'ultimo, infatti, tende ad espellere il calore dall'interno verso l'esterno mentre la pompa di calore lo cattura dall'esterno e, dopo averlo portato a temperatura, lo immette all'interno. Per rinfrescare l'ambiente, invece, il calore viene estratto dall'aria presente all'interno dell'edificio ed espulso, in modo del tutto analogo al frigorifero. Il mezzo esterno da cui si estrae calore è detto sorgente fredda. Nella pompa

di calore il fluido frigorifero assorbe calore dalla sorgente fredda tramite l'evaporatore.

Le principali sorgenti fredde sono:

- L'aria esterna al locale dove è installata la pompa di calore oppure estratta dal locale dove è installata;
- L'acqua di falda, di fiume, di lago quando questa è presente in prossimità dei locali da riscaldare e a ridotta profondità.

Altre sorgenti possono essere costituite dall'acqua accumulata in serbatoi e riscaldata dalla radiazione solare e dal terreno, nel quale vengono inserite le tubazioni relative all'evaporatore. L'aria o l'acqua da riscaldare sono detti "pozzo caldo". Nel condensatore il fluido frigorifero cede al pozzo caldo sia il calore prelevato dalla sorgente fredda che l'energia fornita dal compressore.

Dal punto di vista costruttivo, una pompa di calore è costituita da un circuito chiuso, percorso da uno speciale fluido (frigorifero) che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato di liquido o di vapore. Il circuito chiuso è costituito da:

- Un compressore;
- Un condensatore;
- Una valvola di espansione;
- Un evaporatore;

Il condensatore e l'evaporatore sono costituiti da scambiatori di calore, cioè tubi posti a contatto con un fluido di servizio (che può essere acqua o aria) nei quali scorre il fluido frigorifero. Questo cede calore al condensatore e lo sottrae all'evaporatore. I componenti del circuito possono essere sia raggruppati in un unico blocco, sia divisi in due parti (sistemi split) raccordate dai tubi nei quali circola il fluido frigorifero. Nel funzionamento all'interno del circuito, quest'ultimo subisce le seguenti trasformazioni suddivise in 4 fasi:

1. Fase 1 – Compressione: il fluido frigorifero allo stato gassoso e a bassa pressione, proveniente dall'evaporatore, viene portato ad alta pressione; nella compressione si riscalda assorbendo una certa quantità di calore;
2. Fase 2 – Condensazione: il fluido frigorifero, proveniente dal compressore, passa dallo stato gassoso a quello liquido cedendo calore all'esterno;
3. Fase 3 – Espansione: passando attraverso la valvola di espansione il fluido frigorifero liquido si trasforma parzialmente in vapore e si raffredda;

4. Fase 4 – Evaporazione: il fluido frigorigeno assorbe calore dall'esterno ed evapora completamente.

L'insieme di queste trasformazioni costituisce il ciclo della pompa di calore: fornendo energia con il compressore al fluido frigorigeno, questo, nell'evaporatore, assorbe calore dal mezzo circostante e, tramite il condensatore, lo cede al mezzo da riscaldare.

L'efficienza di questa macchina è espressa come coefficiente di prestazione (COP), pari a:

$$COP = \frac{\text{energia termica sviluppata}}{\text{energia termica assorbita}}$$

Il COP è variabile a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento ed ha, in genere, valori prossimi a 3. Questo vuol dire che per 1 kWh di energia elettrica consumato, fornirà 3 kWh (2580 kcal) di calore al mezzo da riscaldare. Il COP sarà tanto maggiore quanto più bassa è la temperatura a cui il calore viene ceduto (nel condensatore) e quanto più alta quella della sorgente da cui viene assorbito (nell'evaporatore).

Capitolo 3

Calcolo delle curve di termoregolazione non lineari attraverso tecniche di reverse engineering

Come anticipato nel capitolo 1, uno degli obiettivi del progetto consiste nel ricavare le curve climatiche di termoregolazione non lineari attraverso tecniche di reverse engineering al fine di mettere in luce eventuali differenze di prestazioni, vantaggi e svantaggi rispetto a curve climatiche più semplici rappresentate da rette lineari.

La strategia adottata è stata quella di intercettare le curve utilizzando l'heat pump controller RVS61.483, un dispositivo Siemens impiegato come regolatore che gestisce e ottimizza il funzionamento delle pompe di calore per il riscaldamento, il raffrescamento e la produzione di acqua calda sanitaria, unitamente ad un software simulatore di pompa di calore. La logica di termoregolazione utilizzata dall'RVS61.843 è basata su curve climatiche non lineari. In questo capitolo verranno introdotti tutti gli strumenti adottati in questa fase implementativa, lasciando poi spazio alle procedure adottate per ricavare le equazioni polinomiali che descrivono le curve presenti nella specifica Siemens [11].

3.1 Termoregolazione climatica e ambiente

Quando si parla di termoregolazione climatica, introdotta nel paragrafo 2.2.2, l'obiettivo principale è il calcolo della temperatura di mandata del fluido vettore, che si traduce con il riferimento dato al controllore. In base al tipo di informazione utilizzata per la regolazione, si possono distinguere 3 approcci differenti:

1. Termoregolazione basata su sonda esterna (outdoor): in questo caso, il calcolo della temperatura di mandata dipende esclusivamente dal valore della temperatura esterna all'edificio, campionata ad intervalli regolari (il tempo di campionamento è un valore arbitrario scelto in fase di progettazione) da un'apposita sonda collocata all'esterno, solitamente su una parete orientata a nord e mai esposta direttamente alla luce del sole, per evitare di ottenere

misure alterate. Il calcolo della mandata viene quindi effettuato sulla base delle curve climatiche, lineari e non, che verranno approfondite nel paragrafo 3.3.

2. Termoregolazione basata su sonda ambiente interna (indoor): la termoregolazione indoor utilizza sensori posti all'interno dell'edificio per monitorare la temperatura interna. La temperatura letta viene inviata alla centralina dell'impianto, che si occupa di calcolare la temperatura di mandata degli emettitori. Garantisce un maggiore comfort mantenendo la temperatura interna desiderata in modo preciso e rispondendo più rapidamente alle variazioni. Di contro, non tiene conto delle variazioni esterne di temperatura, che possono influenzare il fabbisogno energetico.
3. Termoregolazione indoor+outdoor: La termoregolazione combinata utilizza sia sensori interni che esterni per un controllo più completo e bilanciato, ottimizzando il comfort, l'efficienza energetica, e garantendo un adattamento dinamico della regolazione

In questo progetto si è posta l'attenzione sulla prima delle tre varianti, ponendo come obiettivo della termoregolazione il riscaldamento delle zone, e non il raffrescamento.

3.2 Heat pump controller RVS61.843

L'heat pump controller RVS61.483 è un regolatore Siemens per pompe di calore e altri generatori. E' un dispositivo elettronico che consente di applicare una termoregolazione smart modulante a innumerevoli impianti di riscaldamento, viene installato direttamente nelle abitazioni e può essere controllato da remoto. In questo caso di studio, il dispositivo controllato dall'RVS è una pompa di calore simulata mediante l'apposito software ACS790 (3.3). E' composto da due moduli principali:



Figura 3.1: RVS61.843

- Modulo di base che contiene la logica di controllo e l'interfaccia utente.

- Modulo di espansione che può essere utilizzato per aggiungere funzionalità al dispositivo.

Il modulo di base è dotato di un display LCD e di un pannello di controllo. Il primo contiene informazioni sul funzionamento della pompa di calore, come temperatura interna ed esterna, consumi energetici e molti altri parametri. Il pannello di controllo invece consente di impostare la temperatura desiderata e di accedere alle funzioni di configurazione del dispositivo.

Il modulo di espansione può essere utilizzato per aggiungere funzioni all'RVS, come il controllo di un sistema di riscaldamento a pavimento, un sistema di ventilazione o raffreddamento, per fare alcuni esempi.



Figura 3.2: Interfaccia utente RVS

Di seguito, vengono illustrate le features principali del regolatore RVS61.843:

1. Controllo di pompe di calore monoblocco e biblocco: per le pompe di calore monoblocco, il dispositivo controlla il compressore, la valvola di inversione e la valvola di espansione. Per le pompe di calore biblocco invece vengono controllati il compressore, la valvola di inversione e la pompa di circolazione.
2. Controllo di sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione: per il riscaldamento, l'RVS può controllare sistemi di riscaldamento a pavimento, a radiatori oppure a fancoil. Mentre per il raffrescamento sono compresi impianto a pavimento, sistema di raffreddamento a split o fancoil. Per la ventilazione infine, il dispositivo può essere utilizzato per una VMC (ventilazione meccanica controllata).
3. Interfaccia utente con display LCD (figura 3.2).

4. Possibilità di espansione con moduli opzionali:

- Il modulo AVS75.370, che consente di controllare un sistema di riscaldamento a pavimento;
- Il modulo AVS75.390, che consente di controllare un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC);
- Il modulo AVS75.391, che consente di controllare un sistema di raffreddamento a pavimento;
- Il modulo AVS75.392, che consente di controllare un sistema di raffreddamento a split;
- Il modulo AVS75.393, che consente di controllare un sistema di raffreddamento a fan coil.

Tra le altre caratteristiche principali troviamo una funzione di protezione antigelo (garantisce che la pompa di calore non ghiacci a temperatura esterne molto basse), protezione antiblocco (per prevenire il blocco del compressore), autodiagnosi (consente di rilevare e diagnosticare eventuali guasti o errori), di programmazione settimanale e di commutazione estate/inverno.



Figura 3.3: RVS con sonde integrate

Dal punto di vista costruttivo, l'RVS61.843 è costituito da una centralina con una serie di terminali di connessione (figura 3.4). In applicazioni reali, questi terminali sono collegati direttamente all'impianto di riscaldamento, mentre in questo caso, sono collegati a delle manopole che simulano una serie di sonde (visibili in figura 3.3). I terminali nella parte inferiore sono dedicati agli input, mentre quelli superiori agli output. Di seguito, sono riportati i cablaggi per le sonde più utilizzate durante il progetto:

3.3 Curve di termoregolazione climatiche outdoor

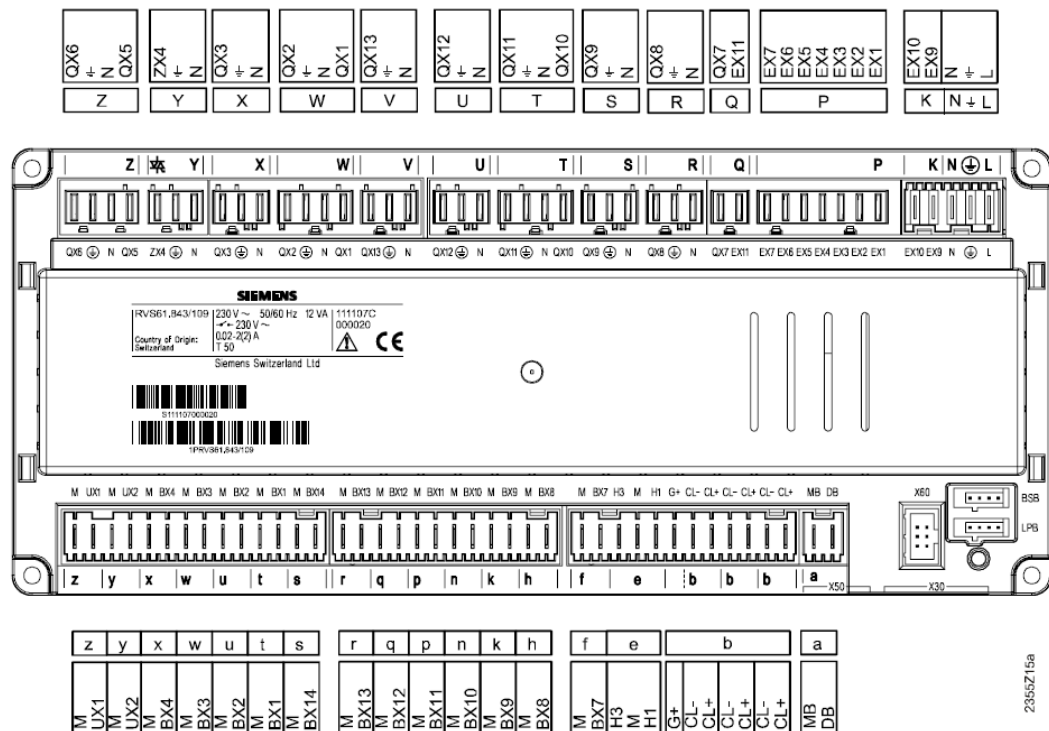


Figura 3.4: Terminali di connessione RVS

- Input BX1: Sonda temperatura ambiente;
- Input BX10: Sonda temperatura di mandata;
- Input BX12: Sonda temperatura di ritorno;
- Input BX9: Sonda temperatura esterna;
- Output QX1: Richiesta di calore;
- Output Q9: Pompa del condensatore;

Queste sono alcune tra le informazioni più importanti che sono state utilizzate, tuttavia è stato necessario configurare manualmente altri terminali di connessione, al fine di poter visualizzare correttamente i parametri e i valori interessati all'interno del simulatore.

3.3 Curve di termoregolazione climatiche outdoor

Il presente studio ha considerato due modelli di curve di termoregolazione outdoor per metterne in luce le differenze più significative. Il primo modello, adottato da Ariston Group, prevede l'utilizzo di curve lineari (figura 3.5), mentre il secondo, con logica Siemens, utilizza curve non lineari (figura 3.6).

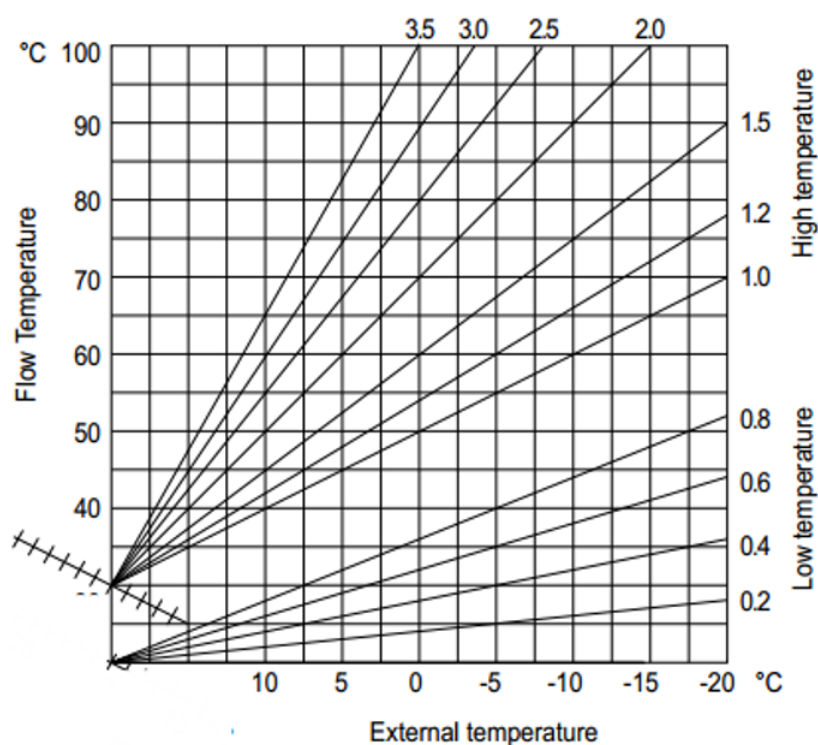


Figura 3.5: Curve lineari Ariston

Il principio di funzionamento della regolazione della temperatura di mandata è il medesimo in entrambi i casi. Le curve mettono in relazione la temperatura esterna con la temperatura di mandata, in modo tale che al diminuire della temperatura misurata dalla sonda esterna corrisponda un aumento della temperatura del fluido vettore.

Come si può notare dalle figure, ad ogni curva è associato un valore, anche detto "slope" o pendenza della curva. Questo fattore è cruciale nel momento in cui le curve devono essere tarate durante l'installazione della centralina dell'impianto di riscaldamento, poichè è indicativo della tipologia di emettitori dell'edificio. Le curve con una pendenza compresa nel range 0.25 - 1 sono rappresentative di un impianto a pavimento, che risponderà quindi più lentamente alle variazioni di temperatura esterna. Al contrario, per valori di slope superiori a 1, si fa riferimento ad un impianto a radiatori. La notevole differenza tra le temperature di mandata dei due emettitori è giustificata dal fatto che la temperatura dell'acqua dei termosifoni, durante il funzionamento, si aggira comunemente tra a 60 °C e i 70 °C, mentre nel caso di un impianto a pavimento la temperatura di regime per il riscaldamento è di circa 35-40 °C. Si possono quindi distinguere zone ad alta temperatura (High-Temperature zone) per il primo caso e zone a bassa temperatura per il secondo (Low-Temperature zone). A questo punto è necessario mettere in evidenza le differenze più significative tra la configurazione Ariston e quella Siemens, per poter comprendere lo sviluppo delle attività successive.

3.3 Curve di termoregolazione climatiche outdoor

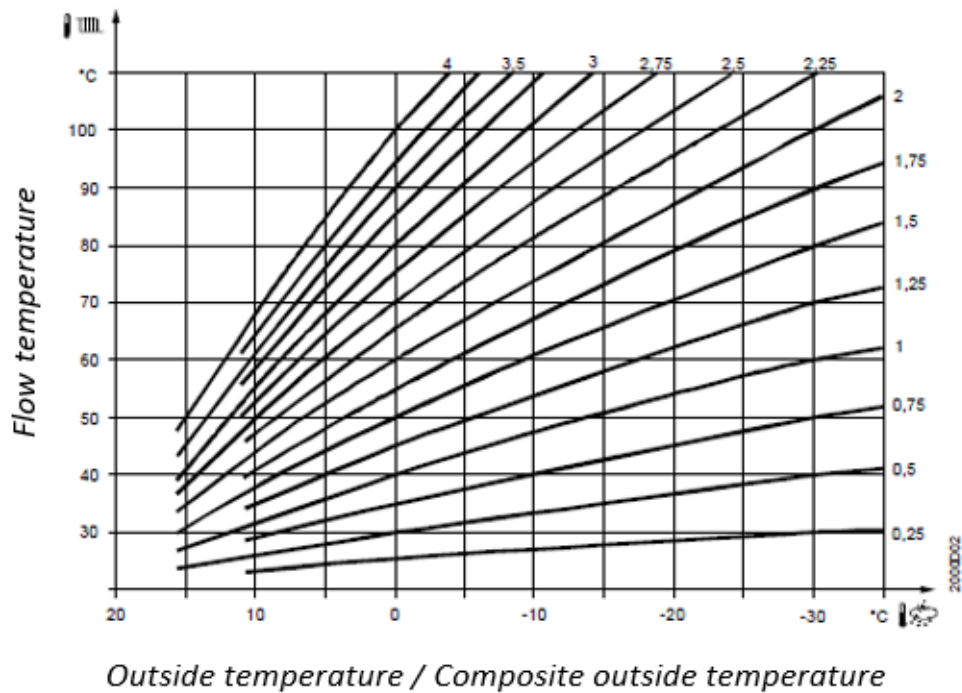


Figura 3.6: Curve non lineari Siemens

Le curve Ariston, essendo lineari, sono espresse dalla comune equazione di una retta del tipo:

$$y = mx + q$$

dove la y rappresenta la temperatura di mandata, la m lo slope della curva e la x la temperatura esterna misurata dalla sonda.

Nel caso Siemens invece le curve sono espresse da un'equazione polinomiale di secondo grado del tipo:

$$y = ax^2 + bx + c$$

che consente di esprimere la non linearità, seppur lieve. Le differenze fondamentali che contraddistinguono l'approccio Siemens sono le seguenti:

- Nella termoregolazione outdoor viene considerato il parametro *Building Time Constant*, ovvero la costante di tempo dell'edificio, che consente di tenere conto dell'inerzia dell'edificio nel calcolo della temperatura di mandata degli emettitori.
- Quando il parametro Building Time Constant è attivo, la regolazione della temperatura di mandata (per convenzione questa verrà chiamata T_{flow}) viene calcolata non sulla temperatura esterna, ma sulla temperatura esterna composta, trattata approfonditamente nella sezione 3.5.

I capitoli 3.4 e 3.5 sono dedicati ai concetti di costante di tempo dell'edificio e di temperatura esterna composita, in quanto argomenti centrali dell'intero progetto di tesi.

3.4 Costante di tempo dell'edificio

La costante di tempo dell'edificio (per convenzione BCT - Building Time Constant nel resto della trattazione) è un parametro utilizzato per monitorare la velocità con cui la temperatura ambiente interna ad un edificio risponde alle variazioni della temperatura esterna. E' progettato per tenere conto delle diverse dinamiche termiche associate a diversi tipi di costruzioni edilizie. Poiché la temperatura esterna varia nel corso del tempo, la temperatura ambiente può cambiare a diverse velocità in base alle caratteristiche termiche dell'edificio. La selezione del valore di BCT, misurato in ore, è basata quindi sul tipo di costruzione dell'edificio. Le diverse tipologie di costruzione possono influenzare la velocità con cui la temperatura ambiente reagisce alle variazioni della temperatura esterna. Alcuni esempi tratti dalla letteratura sono i seguenti:

- Valori maggiori di 20h: La temperatura ambiente risponde più lentamente alle variazioni della temperatura esterna.
- Valori compresi tra 10h e 20h: Configurazione intermedia che potrebbe adattarsi alla maggior parte degli edifici.
- Valori inferiori a 10h: La temperatura ambiente risponde più rapidamente alle variazioni della temperatura esterna.

Questi valori sono pressochè generici e danno delle linee guida generali sul setup di questo parametro. Tuttavia, stabilire esattamente qual è il valore di BCT per un determinato edificio è una procedura non banale, in quanto richiede un'approfondita analisi e numerose simulazioni di scenari reali.

Per capire meglio il concetto espresso dal BCT, è possibile pensare ad una parete verticale opaca come un filtro RC, ovvero un sistema che permette il passaggio di frequenze al di sotto di una determinata soglia, detta frequenza di taglio (cut-off frequency). Il filtro RC è l'esempio più semplice di filtro passa-basso, un circuito progettato per lasciare passare i segnali elettrici con frequenze da zero alla frequenza di taglio ω_0 . Quest'ultima, dal punto di vista dell'analisi in frequenza, può essere definita come la frequenza in corrispondenza della quale l'ampiezza del segnale viene attenuata di -3dB (*decibel*), che equivale ad uno smorzamento del 30% (figura 3.8). Di conseguenza, i parametri RC del filtro possono essere associati alla resistenza e alla capacità termica della parete, consentendo di definire la BCT come fattore attenuante della temperatura esterna che penetra all'interno della parete.

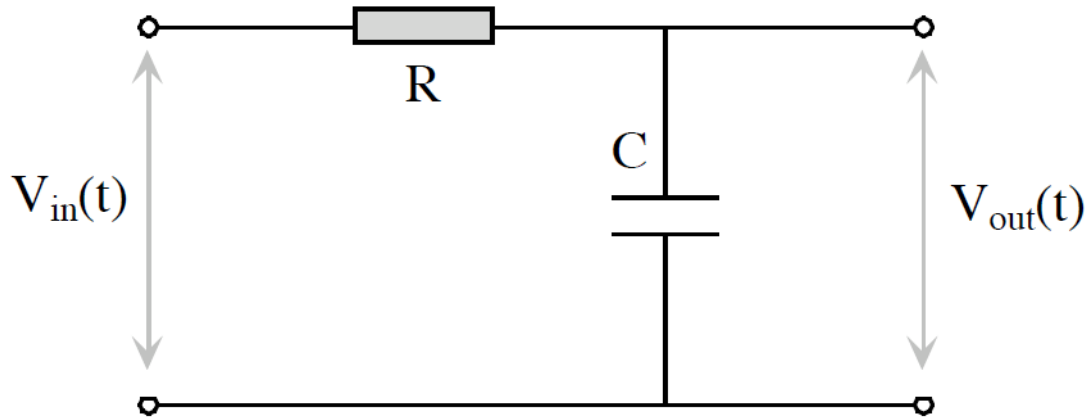


Figura 3.7: Schema circuitale filtro RC

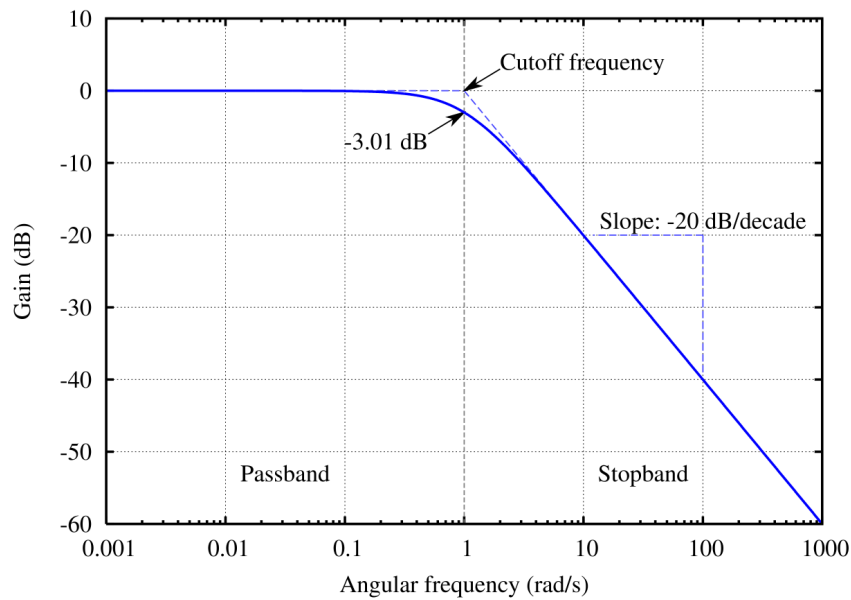


Figura 3.8: Risposta in frequenza di un filtro passa basso

La BCT è quindi una misura matematica conveniente per descrivere una proprietà termica di un edificio, ed assume un ruolo fondamentale poichè impostarne il valore corretto nella termoregolazione, consente di avere una risposta dell'impianto di riscaldamento graduale e che meglio si adatta alle peculiarità edilizie della costruzione. Per fare un esempio, a fronte di un brusco abbassamento della temperatura esterna, a seconda del BCT, la variazione della temperatura ambiente all'interno dell'edificio sarà graduale, con una maggiore reattività per costanti di tempo basse, e una minore reattività per costanti di tempo alte.

Nel campo dei controlli automatici, la costante di tempo di un sistema viene definita come il tempo che impiega un sistema a raggiungere il 63% del valore di regime

(figura 3.9). In questo caso, la costante di tempo di un edificio rappresenta, a fronte di una variazione di temperatura esterna, il tempo che impiega la temperatura ambiente di una zona ad assestarsi al 63% della variazione totale di temperatura.

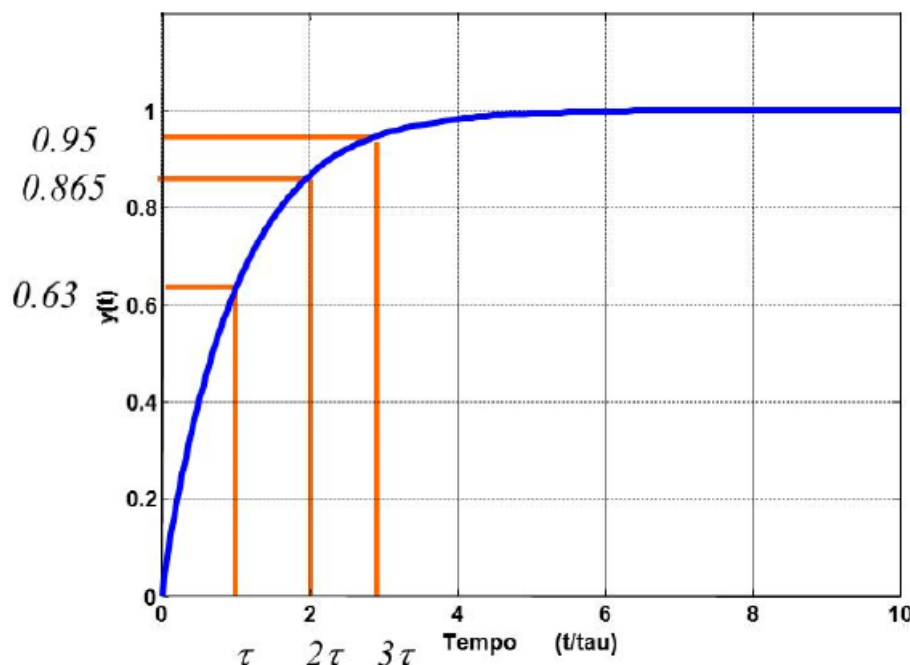


Figura 3.9: Risposta a gradino di un sistema del primo ordine

3.5 Temperatura esterna composita

La logica Siemens prevede che quando il parametro $BCT \neq 0$ la termoregolazione outdoor viene fatta non in funzione della temperatura esterna, bensì della temperatura esterna composita. Quest'ultima è definita concettualmente come:

$$T_{composite} = (T_{outdoor} * 0.5) + (T_{filtered} * 0.5) \quad (3.1)$$

dove $T_{filtered}$ rappresenta la temperatura esterna filtrata attraverso la costante di tempo dell'edificio. Da ciò si evince che la temperatura esterna composita è data da due contributi, il 50% della temperatura esterna e il 50% di quella filtrata.

La $T_{composite}$ avrà quindi un andamento più smorzato rispetto alla temperatura esterna, a causa della componente filtrante data dal BCT . Inoltre, la logica Siemens prevede l'introduzione di un altro tipo di temperatura, chiamata "*Attenuated Outside Temperature*", che altro non è che la temperatura esterna filtrata due volte attraverso il BCT .

Queste tipologie di temperatura esterna vengono impiegate per due motivi principali:

- Applicare il "*summer/winter changeover*": questa funzione consente di passare da modalità inverno ad estate e viceversa in base alla temperatura registrata dalla sonda. Per fare un esempio, quando si passa dai mesi più freddi alla primavera, nel momento in cui viene letta una temperatura esterna superiore ad una certa soglia, la termoregolazione viene effettuata sulla base della $T_{composite}$ oppure della $T_{attenuated}$. Questo perchè con temperature esterne più alte, la necessità di riscaldare l'ambiente viene meno, e quindi le temperature appena citate consentono di garantire comunque il comfort degli utenti ma risparmiando notevolmente sui costi e i consumi (dal momento che la temperatura di mandata sarà indubbiamente più bassa e graduale grazie all'azione smorzante del *BCT*).
- Tenere conto dell'inerzia dell'edificio nella termoregolazione: questo consente di "adattare" la termoregolazione alla tipologia di edificio specifica, consentendo di regolare la temperatura al meglio.

Ai fini di questo progetto, si è posta maggiore attenzione sulla $T_{composite}$ piuttosto che sulla $T_{attenuated}$.

Per quanto riguarda infine il calcolo analitico della $T_{composite}$, nel capitolo 4 viene approfondita tutta la procedura, i test e le validazioni necessari per la sintesi di una formula a tempo discreto che consente di ottenere il comportamento illustrato in 3.1.

3.6 Simulatore ACS790

Il software ACS790 è una soluzione progettata per la gestione, il monitoraggio e il servizio degli impianti HVAC. Offre funzionalità avanzate per l'operatività e la manutenzione degli impianti, inclusi la messa in servizio e la manutenzione.

In questo caso specifico, questo strumento è stato utilizzato per interfacciarsi con una pompa di calore che simulasse la logica Siemens, al fine di effettuare delle simulazioni e ricavare le curve di termoregolazione *outdoor* non lineari. Nell'interfaccia principale (figura 3.10) appaiono lo schema della pompa di calore sulla destra, mentre sulla sinistra vengono messi a disposizione una serie di parametri, alcuni di input, altri in output, che mostrano a 360° il funzionamento dell'impianto. Inoltre, regolando le manopole collegate alle sonde citate in precedenza, è possibile modificare le temperature direttamente sul sistema simulato.

Nello schema idraulico della pompa di calore (3.11), vengono illustrati i principali componenti (introdotti nel capitolo 2.4.2):

1. Ventilatore;
2. Evaporatore;

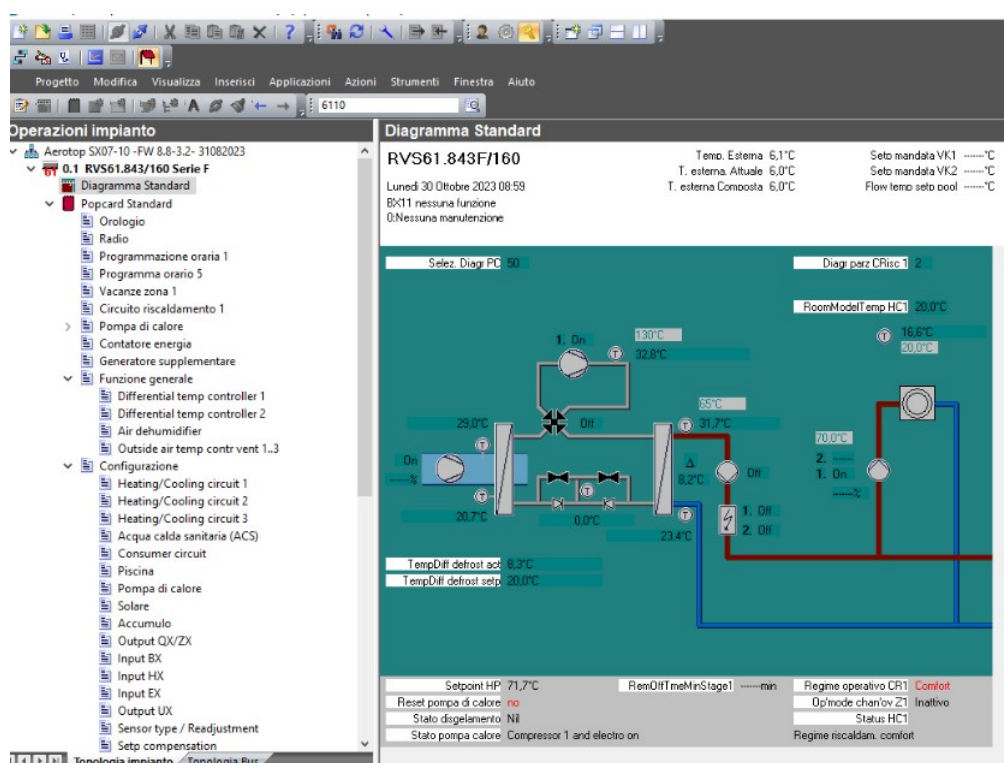


Figura 3.10: Interfaccia ACS

3. Compressore;
4. Condensatore;
5. Pompa del circuito di riscaldamento;

Mentre le frecce rosse indicano rispettivamente da destra, la temperatura ambiente (regolabile tramite sonda), la temperatura di mandata e la temperatura di ritorno all'impianto. Nel restante schema idraulico, contrassegnati dal simbolo "T", sono presenti diversi sensori di temperatura che monitorano il funzionamento dell'impianto.

Nella parte inferiore della figura 3.10 viene invece visualizzato lo stato corrente della pompa di calore, attraverso informazioni come il setpoint della pompa e lo stato, che sarà impostato su "No request" nel caso di assenza di richiesta di calore, ovvero se la temperatura esterna è superiore al setpoint impostato, oppure su "Compressor ON" se la temperatura esterna è minore del setpoint (in questo caso il compressore viene azionato a seguito dell'attivazione della richiesta di calore). Inoltre, in condizioni di freddo particolarmente estremo (-15/20 °C) viene attivata la funzione "Frost protection" per proteggere l'impianto da un potenziale danneggiamento.

Infine, nella parte superiore dello schema idraulico (3.10), sono riportate $T_{outdoor}$, $T_{composite}$ e $T_{attenuated}$, di fondamentale importanza per le simulazioni da eseguire in seguito.

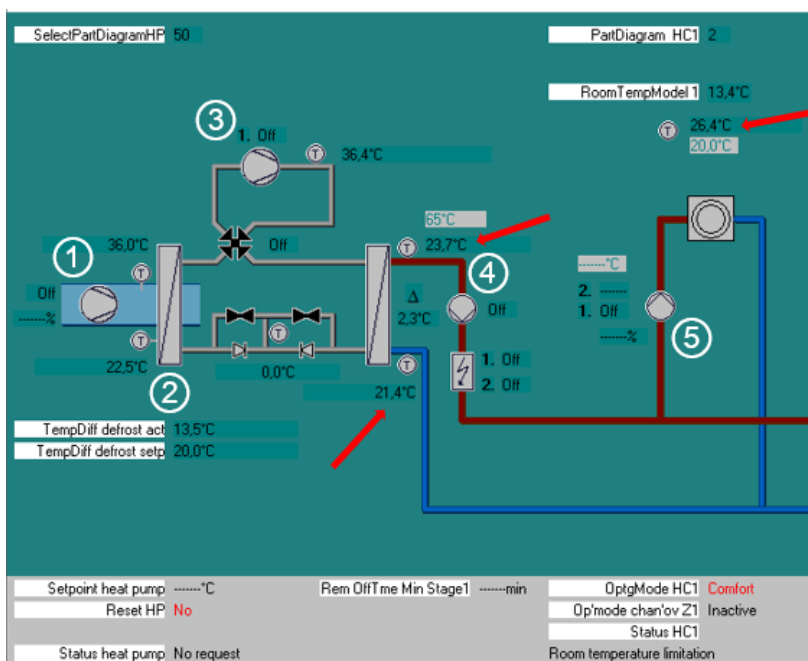


Figura 3.11: Schema idraulico pompa di calore

3.7 Sintesi delle curve di termoregolazione

Per ricavare le curve di termoregolazione *outdoor* non lineari, sono state effettuate simulazioni specifiche sul regolatore RVS61.843 tramite il software ACS790. Per comprenderne la logica, è importante definire preventivamente i parametri, regolabili nel simulatore, che influenzano la termoregolazione outdoor:

- *Room Setpoint*: temperatura ambiente desiderata dall'utente;
- *Slope*: pendenza della curva di termoregolazione;
- *Building Time Constant*: se attivo la mandata viene calcolata sulla $T_{composite}$, altrimenti sulla $T_{outdoor}$;
- *Room influence*: questo parametro, regolabile in %, consente di scegliere la modalità di termoregolazione tra indoor (100%), outdoor (0%) e indoor+outdoor (1-100%). La percentuale scelta rappresenta l'influenza che avrà la sonda ambiente sulla termoregolazione;
- *Heating curve displacement*: spostamento parallelo della curva;
- *Outside temperature* (temperatura esterna);

I parametri appena citati sono stati modificati di simulazione in simulazione per poter intercettare tutte le curve presenti nella specifica Siemens, una prima configurazione di esempio è la seguente:

- Room Setpoint = 20 °C (generica temperatura di comfort nella stagione invernale);
- Slope = 1;
- BCT = 0;
- Room Influence = 0 %;
- Heating Curve Displacement = 0;
- Temperatura esterna: viene fatta variare di volta in volta da 20 °C a -30 °C (range di temperature presenti nel grafico delle curve di termoregolazione) con salti di 5 °C;

Una volta settati i parametri nel software ACS790, si è andati ad attivare la richiesta di calore portando la temperatura esterna al di sotto del setpoint (20 °C) regolando la manopola collegata al terminale di connessione dell'RVS responsabile della temperatura ambiente. In questo modo la pompa di calore si attiva e viene calcolata la temperatura di mandata (T_{flow}) in base alle curve di termoregolazione. A questo punto il valore della mandata è stato salvato in un'apposita tabella. Ripetendo questo procedimento per temperature esterne decrescenti fino a -30 °C con decrementi di 5°(diminuendola ulteriormente tramite la manopola presente sull'RVS), si ottengono tutti i punti che caratterizzano la curva di termoregolazione outdoor nei valori $x = 20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30$ °C.

Una volta terminata la simulazione, si ottiene una serie di punti che congiungono una retta, che equivale alla curva di termoregolazione presente in figura 3.6 (un esempio è riportato in tabella 3.1). Le equazioni polinomiali che descrivono le rette verranno calcolate successivamente in MatLab.

La procedura appena descritta è stata ripetuta per tutte le pendenze, in modo tale da riuscire a ricostruire tutte le curve. Inoltre, per ogni slope, è stato variato anche il *Room Setpoint* reiterando la variazione di temperatura esterna salvando tutti i valori di T_{flow} , in modo da caratterizzare le curve totalmente e coprendo tutti i possibili valori di set-point ambiente impostabili dall'utente finale.

Procedendo con i test, sono emersi due aspetti importanti:

- Le curve della specifica Siemens fanno riferimento ad un *Room Setpoint* pari a 18 °C;
- Con il variare del *Room Setpoint* e a parità di slope, le curve vengono traslate verticalmente di una quantità (in °C) lineare (questo punto sarà approfondito nel sottocapitolo 3.8);

3.8 Shifting delle curve al variare del Room Setpoint

Room Setpoint = 20			
Slope	$T_{outdoor}$	T_{flow}	Setpoint Heat Pump
1	15°	30.8°	29.6°
	10°	35.3°	33°
	5°	39.5°	36°
	0°	43.5°	38.9°
	-5°	47.3°	41.5°
	-10°	50.8°	43.9°
	-15°	54.2°	46°

Tabella 3.1: Valori simulazione con Room Setpoint 20°

Alla fine dell'acquisizione dei punti, le rette risultanti sono state rappresentate in un grafico (3.12). Queste sono inizialmente lineari dal momento che scaturiscono dalla semplice unione dei punti di T_{flow} trovati. Come si può notare, nella parte

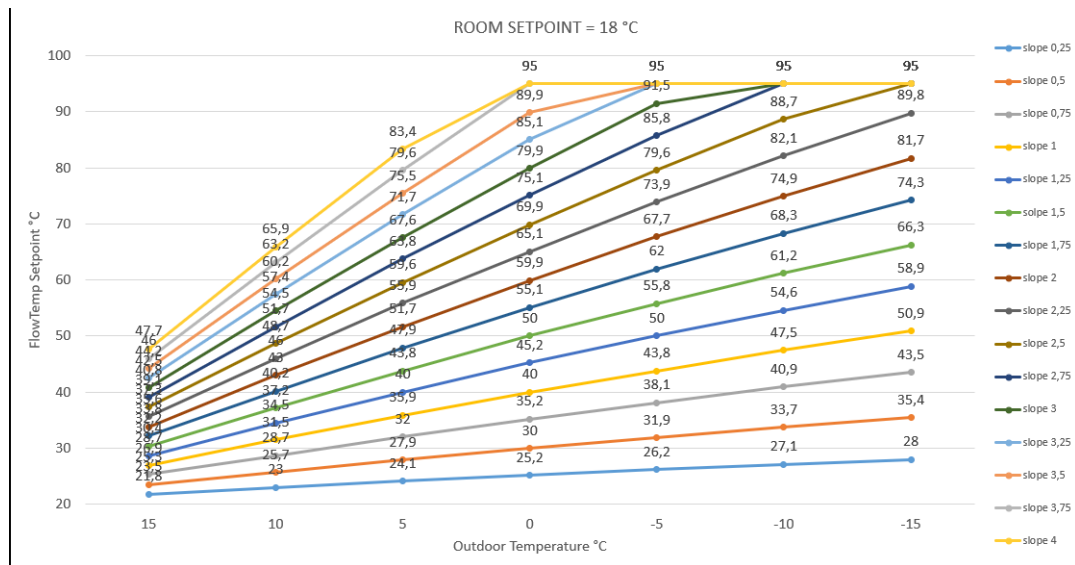


Figura 3.12: Grafico rette per Room Setpoint 18 °C

culminante del grafico, le rette con *slope* più alto tendono a saturare tutte in corrispondenza di 95 °C, che corrisponde al limite superiore impostato nel software ACS790 per la temperatura di mandata. Da un punto di vista applicativo, risulta ragionevole che non venga superata questa soglia, dal momento che i termosifoni possono arrivare solitamente a temperature di esercizio di 70/80 °C, mentre per gli impianti a pavimento, che lavorano a bassa temperatura, il range è da 35 a 40 °C.

3.8 Shifting delle curve al variare del Room Setpoint

Uno degli obiettivi di questo caso di studio è stato quello di stabilire come cambiasse le curve di termoregolazione al variare del room setpoint. Per identificare il comportamento delle curve, sono state considerate le rette a parità di slope, ma

variando il setpoint in modo incrementale, osservando come viene traslata la retta di termoregolazione.

Nel grafico 3.13 è possibile osservare l'andamento delle curve con slope fissato a 1, ma room setpoint che è stato fatto variare (regolandolo su ACS790) tra 16 e 24 °C.

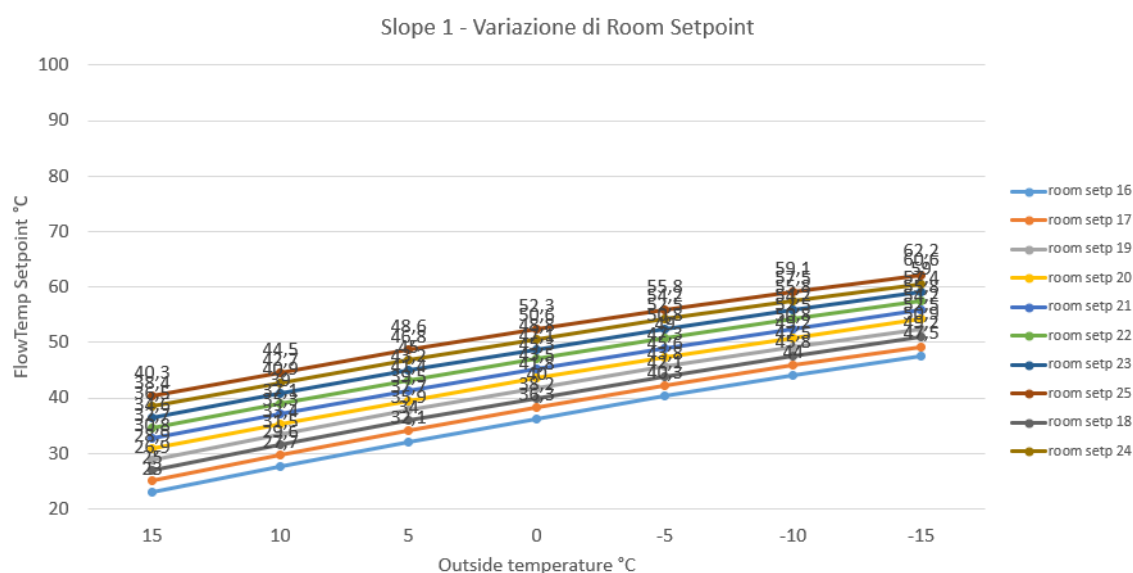


Figura 3.13: Rette di termoregolazione al variare del Room Setpoint

Si nota come le rette vengano traslate verticalmente di una quantità lineare per ogni grado di setpoint ambiente. Questo comportamento ricorre anche cambiando la pendenza, tuttavia, all'aumentare dello slope, aumenta anche il divario tra le rette per ogni grado di setpoint. Un altro esempio è presentato in figura 3.14: qui si nota come, mantenendo lo slope a 2.25 e variando il setpoint da 16 a 18 °C le rette si spostano verticalmente della stessa quantità, ovvero di di 3.15° per ogni grado di room setpoint. Nella tabella 3.2 sono state riportati valori per tutti gli slope, ovvero di quanto la retta viene shiftata verticalmente.

3.8 Shifting delle curve al variare del Room Setpoint

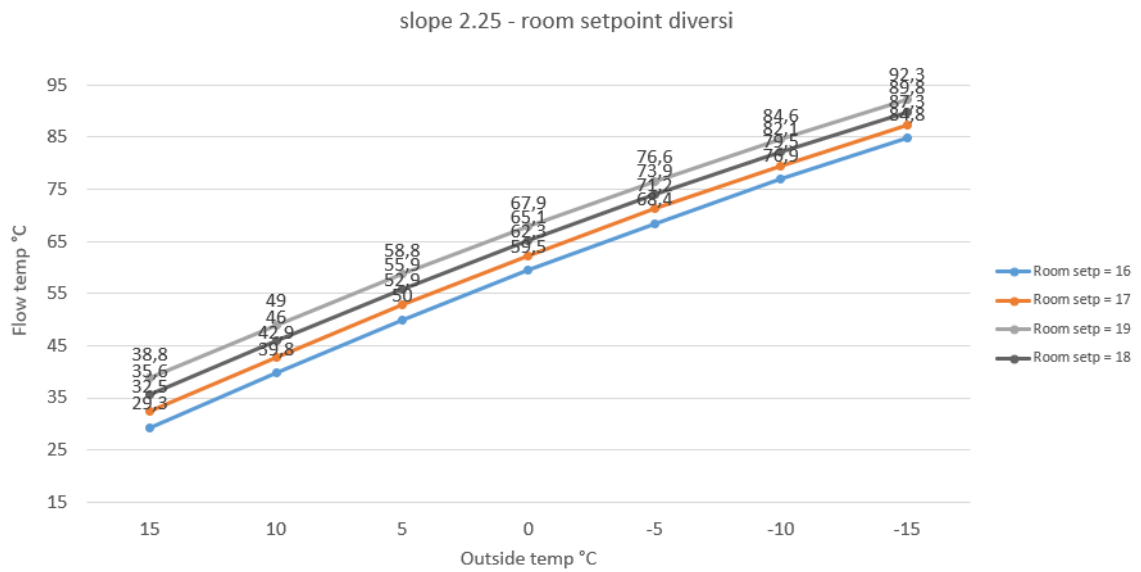


Figura 3.14: Variazione delle rette con pendenza 2.25

Slope	Offset per ogni variazione di 1 °C di Room Setpoint
0.25	1.25°
0.50	1.45°
0.75	1.75°
1	1.94°
1.25	2.20°
1.50	2.45°
1.75	2.65°
2	2.90°
2.25	3.15°
2.50	3.33°
2.75	3.65°
3	3.85°
3.25	4.10°
3.50	4.35°
3.75	4.60°
4	4.85°

Tabella 3.2: Shifting verticale delle curve di termoregolazione

Di conseguenza, il setpoint ambiente influenza anche la formula della termoregolazione introdotta in precedenza:

$$y = ax^2 + bx + c$$

in cui:

- y : temperatura di mandata dell'impianto (T_{flow});
- x : temperatura esterna ($T_{outdoor}$);
- a, b, c : coefficienti del polinomio di secondo grado (noti);

Per introdurre l'influenza del setpoint ambiente è sufficiente sommare al termine noto uno degli offset trovati in precedenza. Sommando una costante al termine noto di un polinomio di secondo grado si introduce una traslazione verticale della curva polinomiale descritta da quest'ultimo. La formula diventa quindi:

$$y = ax^2 + bx + (c + d)$$

in cui d rappresenta lo shifting verticale introdotto dal setpoint ambiente. Con questa soluzione si adatta la formula polinomiale alle esigenze dell'utente, qualora desiderasse cambiare il room setpoint, adattando le curve di termoregolazione.

3.9 Plot delle curve di termoregolazione tramite regressione polinomiale

Per la realizzazione delle curve di termoregolazione finali, come quelle presenti nella specifica Siemens, sono state ricostruite le curve non lineari relative ad un room setpoint di 18°. Il plot è stato realizzato in MatLab, un software di calcolo numerico che mette a disposizione una grande varietà di strumenti matematici e trova numerose applicazioni nell'analisi dati, lo sviluppo di algoritmi e la creazione di modelli.

L'algoritmo, consultabile per intero in 1.1, è progettato per costruire le curve specifiche utilizzate da Siemens, che vengono utilizzate per controllare il flusso della temperatura nel sistema di riscaldamento. Innanzitutto, vengono definiti una serie di vettori x che rappresentano la temperatura esterna in gradi Celsius e una serie di vettori y che rappresentano il setpoint della temperatura di flusso associato a diversi valori di pendenza (slope). Questi valori di pendenza indicano quanto rapidamente la temperatura del flusso deve cambiare in risposta a variazioni della temperatura esterna.

Successivamente, l'algoritmo esegue un'operazione di regressione polinomiale utilizzando la funzione *polyfit* per adattare un polinomio di secondo grado ai dati forniti. Vengono calcolati i coefficienti del polinomio adattato per ciascun set di dati di temperatura.

```
% Esempio con pendenza 0.25  
p1 = polyfit(x, y1, 2);
```

3.9 Plot delle curve di termoregolazione tramite regressione polinomiale

Dopo aver ottenuto i coefficienti del polinomio adattato, vengono calcolati i valori della curva interpolata utilizzando la funzione *polyval*. Questi valori vengono quindi utilizzati per tracciare le curve polinomiali interpolanti.

```
x_plot1 = linspace(min(x), max(x), 100); % Calcolo  
      vettore x  
% Valutazione polinomio in ogni punto di x_plot1  
y_plot1 = polyval(p1, x_plot1);
```

I valori interpolati vengono utilizzati per tracciare le curve polinomiali interpolanti utilizzando una libreria grafica appropriata. Questi grafici mostrano come i setpoint della temperatura di flusso variano al variare della temperatura esterna, con diverse curve per le diverse pendenze. Infine, vengono stampati i polinomi associati a ciascuna curva interpolata. Questi polinomi esprimono le equazioni delle curve in base ai coefficienti polinomiali calcolati.

Il risultato finale è mostrato in figura 3.15

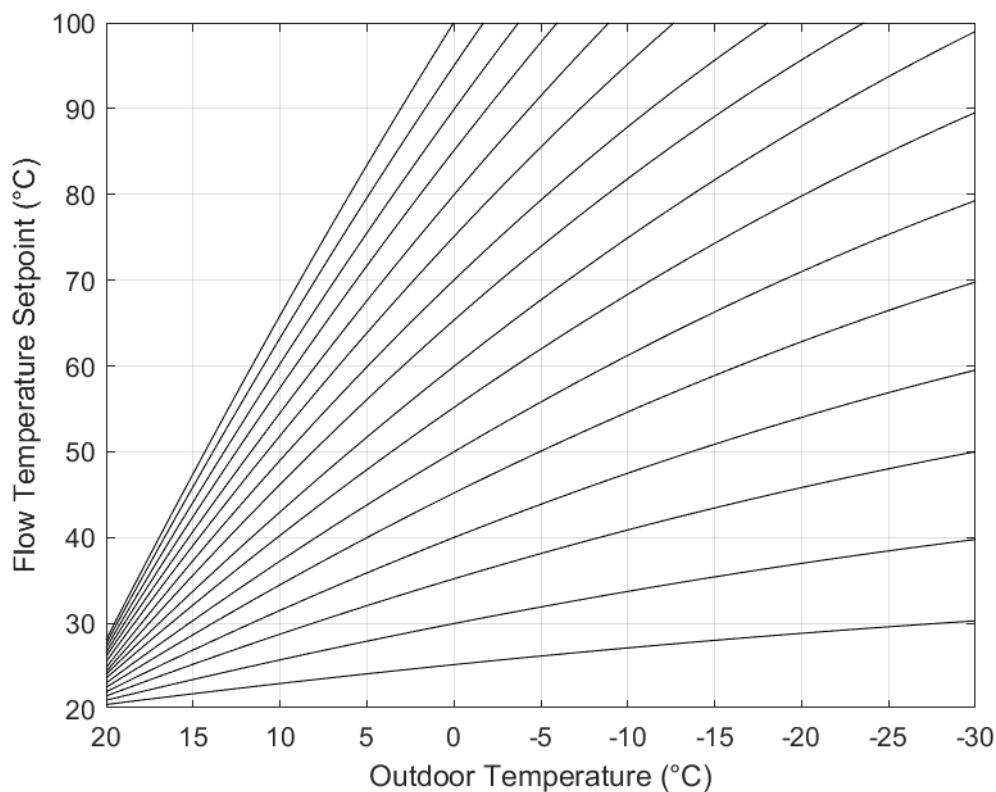


Figura 3.15: Curve non lineari calcolate

Mentre le equazioni polinomiali di secondo grado che definiscono le curve sono le

seguenti:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= -1.2448 \times 10^{-3}x^2 - 2.0754 \times 10^{-1}x + 25.1773 \\
 y_2 &= -2.3963 \times 10^{-3}x^2 - 3.9887 \times 10^{-1}x + 29.9646 \\
 y_3 &= -3.7809 \times 10^{-3}x^2 - 6.0745 \times 10^{-1}x + 35.1843 \\
 y_4 &= -4.9650 \times 10^{-3}x^2 - 7.9965 \times 10^{-1}x + 39.9944 \\
 y_5 &= -6.2424 \times 10^{-3}x^2 - 1.0073x + 45.1800 \\
 y_6 &= -7.4079 \times 10^{-3}x^2 - 1.1990x + 49.9786 \\
 y_7 &= -8.6154 \times 10^{-3}x^2 - 1.4051x + 55.1530 \\
 y_8 &= -9.8636 \times 10^{-3}x^2 - 1.5979x + 59.9412 \\
 y_9 &= -1.3251 \times 10^{-2}x^2 - 1.7823x + 65.3307 \\
 y_{10} &= -1.5643 \times 10^{-2}x^2 - 1.9439x + 69.9982 \\
 y_{11} &= -1.5524 \times 10^{-2}x^2 - 2.1662x + 75.0714 \\
 y_{12} &= -1.5071 \times 10^{-2}x^2 - 2.3876x + 79.9207 \\
 y_{13} &= -1.6000 \times 10^{-2}x^2 - 2.6040x + 85.1000 \\
 y_{14} &= -1.7429 \times 10^{-2}x^2 - 2.7894x + 89.8886 \\
 y_{15} &= -1.9429 \times 10^{-2}x^2 - 2.9794x + 94.9886 \\
 y_{16} &= -1.8000 \times 10^{-2}x^2 - 3.2380x + 100.0500
 \end{aligned}$$

3.10 Validazione delle curve di termoregolazione

In capitolo conclusivo sulle curve di termoregolazione, viene trattata la validazione di quest'ultime attraverso l'implementazione di un modello MatLAB/Simulink. Simulink si caratterizza come l'ambiente di programmazione grafico associato a Matlab, ed è particolarmente indicato per costruire schemi a blocchi di sistemi dinamici lineari e non lineari e per eseguire la loro simulazione. Mette a disposizione una grande serie di moduli predefiniti, con la possibilità per l'utente di crearne di nuovi, eventualmente anche programmati in "C" o "Fortran".

L'algoritmo di validazione, contenuto nel blocco "*curve selector*" (1.2), si occupa di selezionare la temperatura di mandata dell'impianto in base alla temperatura esterna e alla pendenza della curva di termoregolazione, ed è articolato in 8 fasi:

1. La funzione "*curve selector*" prende come input la temperatura esterna ($T_{outdoor}$) e la pendenza della curva (*slope*).
2. Viene definito un array "*slope values*" che rappresenta i valori validi della pendenza della curva.

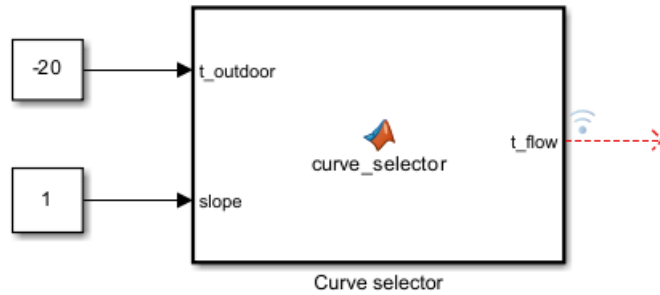


Figura 3.16: Modello Simulink per la validazione delle curve

3. Viene controllato se il valore della pendenza è presente nell'array *slope values*. Se non è presente, viene restituito un errore indicando di selezionare una pendenza valida tra 0.25 e 4.
4. Viene trovato l'indice corrispondente alla pendenza nella matrice "*coefficients*" (che contiene i coefficienti delle equazioni polinomiali di secondo grado per ciascuna pendenza).
5. Viene utilizzata una struttura di controllo *switch* per assegnare l'indice corretto in base al valore della pendenza.
6. Viene definita la matrice *coefficients* che contiene i coefficienti delle equazioni polinomiali di secondo grado per ciascuna pendenza.
7. Viene utilizzata la funzione "*polyval*" per calcolare il valore della temperatura di mandata (t_{flow}) utilizzando i coefficienti corrispondenti alla pendenza selezionata e la temperatura esterna.
8. La temperatura di mandata viene restituita come output dell'algoritmo.

A questo punto, si può testare tutto il range di temperature esterne 20/-30 °C e tutti gli slope, confrontando l'output fornito dalle curve con i valori di T_{flow} registrati durante le simulazioni con il regolatore RVS61.843. La verifica è stata effettuata non solo dando come input valori costanti di temperatura esterna, ma anche funzioni vere e proprie (ad esempio seno e rampa). Di seguito sono riportati alcuni risultati della validazione, che confermano la correttezza dei valori della mandata forniti dalle curve.

Nell'immagine 3.17 sono state graficate la temperatura esterna, rappresentata da una sinusoide con ampiezza 5 (che oscilla quindi tra +5 e -5 gradi Celsius) e la corrispondente temperatura di mandata calcolata in base alle curve di termoregolazione. La pendenza invece è stata impostata a 1.

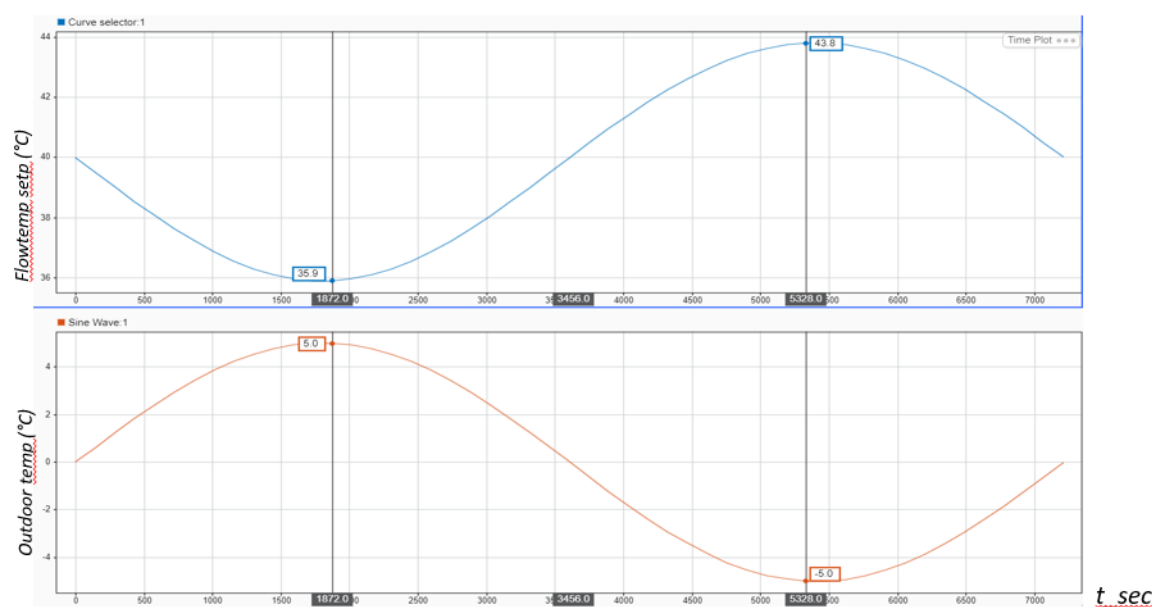


Figura 3.17: Validazione curve con sinusoide di temperature esterne

I valori di mandata in corrispondenza di -5° e $+5^\circ$ (rispettivamente 43.8° e 35.9°) sono verificabili nella tabella 3.3 e come si può notare corrispondono.

Room Setpoint = 18		
Slope	$T_{outdoor}$	T_{flow}
1	15°	26.9°
	10°	31.5°
	5°	35.9°
	0°	40°
	-5°	43.8°
	-10°	47.5°
	-15°	50.9°

Tabella 3.3: Valori di mandata per validazione curve

Un altro esempio di validazione, questa volta con un input di temperatura esterna come rampa, è illustrato in figura 3.18. In questo caso si hanno 31.9°C di mandata a -5° di temperatura esterna e 35.4°C a -15° , verificabili in tabella 3.4.

Si può notare come, non appena la temperatura esterna arriva a -30°C , la temperatura di mandata satura e si assesta su un valore fisso. Questo accade perchè i dati di temperatura di mandata con cui sono state interpolate le curve coprono temperature esterne fino a -30°C . Di conseguenza, per temperature inferiori a -30° oppure maggiori di 20° le curve non sono state modellate, e in questi casi si limitano a fornire la temperatura di mandata massima calcolata in precedenza (per temperature esterne come -35° la mandata corrisponde al valore di regime calcolato a -30°).

Oltre a questi esempi esplicativi di validazione, sono stati effettuati anche altri

3.10 Validazione delle curve di termoregolazione

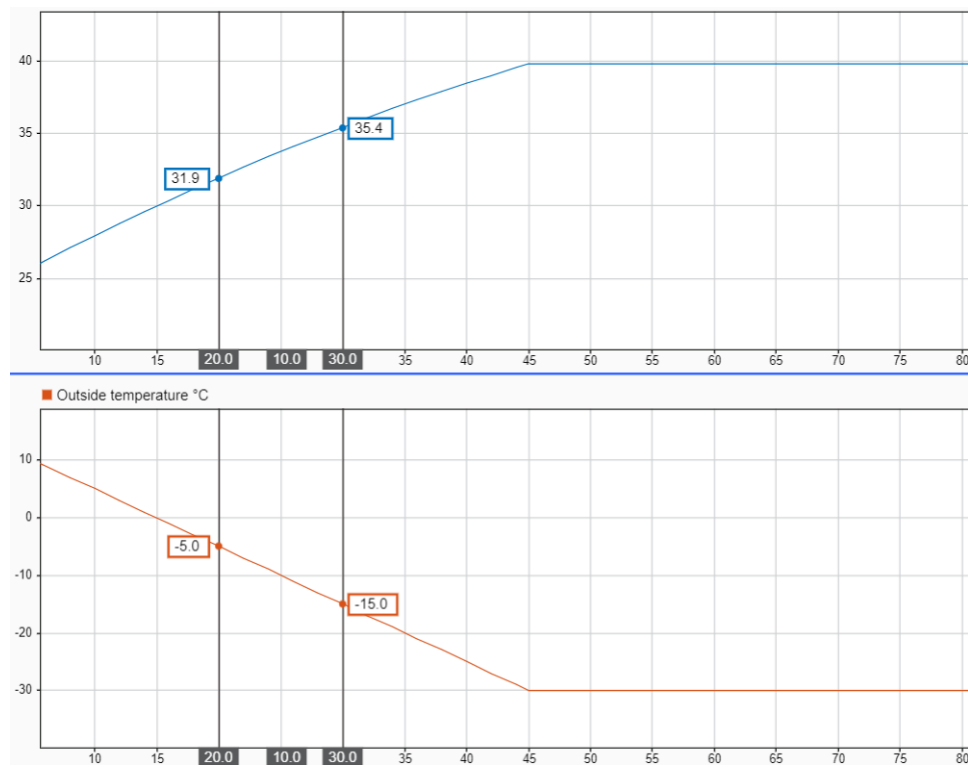


Figura 3.18: Validazione curve con rampa di temperature esterne

test con input diversi (sia di temperatura esterna che di slope) per confermare la validità del risultato ottenuto.

<i>Room Setpoint = 18</i>		
Slope	$T_{outdoor}$	T_{flow}
1	15°	23.5°
	10°	25.7°
	5°	27.9°
	0°	30°
	-5°	31.9°
	-10°	33.7°
	-15°	35.4°

Tabella 3.4: Valori di mandata per validazione curve

Capitolo 4

Formula di calcolo della temperatura esterna composita

La $T_{composite}$, introdotta in 3.5 e definita solo concettualmente, è un importante tassello, insieme alle curve di termoregolazione, per arrivare ad implementare un modello Simulink al fine di effettuare le simulazioni comparative tra le curve Ariston e quelle Siemens. Inoltre risulta fondamentale per introdurre l'inerzia dell'edificio nel calcolo della temperatura di mandata.

4.1 Fase di test sul regolatore RVS61.843

Il primo passo per arrivare a definire una formula che esprimesse il concetto di $T_{composite}$ è stato quello di effettuare delle simulazioni sul regolatore RVS61.843 attraverso il simulatore ACS790. Successivamente, procedendo per tentativi, si è risaliti al filtro del primo ordine che viene impiegato per calcolare la componente attenuata della $T_{composite}$, ovvero quella influenzata dal BCT .

L'RVS mette a disposizione un'utile funzione di logging per tenere traccia dei parametri desiderati durante il funzionamento dell'impianto. A tal proposito, per studiare l'andamento della temperatura esterna composita, è stato simulato il funzionamento della pompa di calore in regime di riscaldamento per diverse ore, con il parametro BCT (che attiva la $T_{composite}$ nella termoregolazione al posto della temperatura esterna semplice), per poi osservarne il trend.

Analogamente ai test effettuati nella sezione 3.7, nel software ACS790 è stata attivata la pompa di calore abbassando manualmente la temperatura esterna al di sotto del setpoint, innescando la richiesta di calore. I parametri che influenzano la termoregolazione sono stati configurati come segue:

- Room setpoint = 18 °C;
- Slope = 1;

- Building time constant = 1 h;
- $T_{outdoor} = T_{composite} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Iniziando da questi parametri iniziali, la temperatura esterna è stata variata in modo repentino di 15° fino a -10° (variazione a gradino). Il sistema è stato lasciato attivo per diverse ore, in modo da poter osservare l'intero comportamento della $T_{composite}$ fino al raggiungimento del suo valore di regime. Il risultato è osservabile nel grafico 4.1, dove sono riportati temperatura esterna, temperatura esterna composta, temperatura esterna attenuata e temperatura di mandata dell'impianto nel tempo. I valori sono stati acquisiti con un campionamento di 30 secondi. Si nota come, al

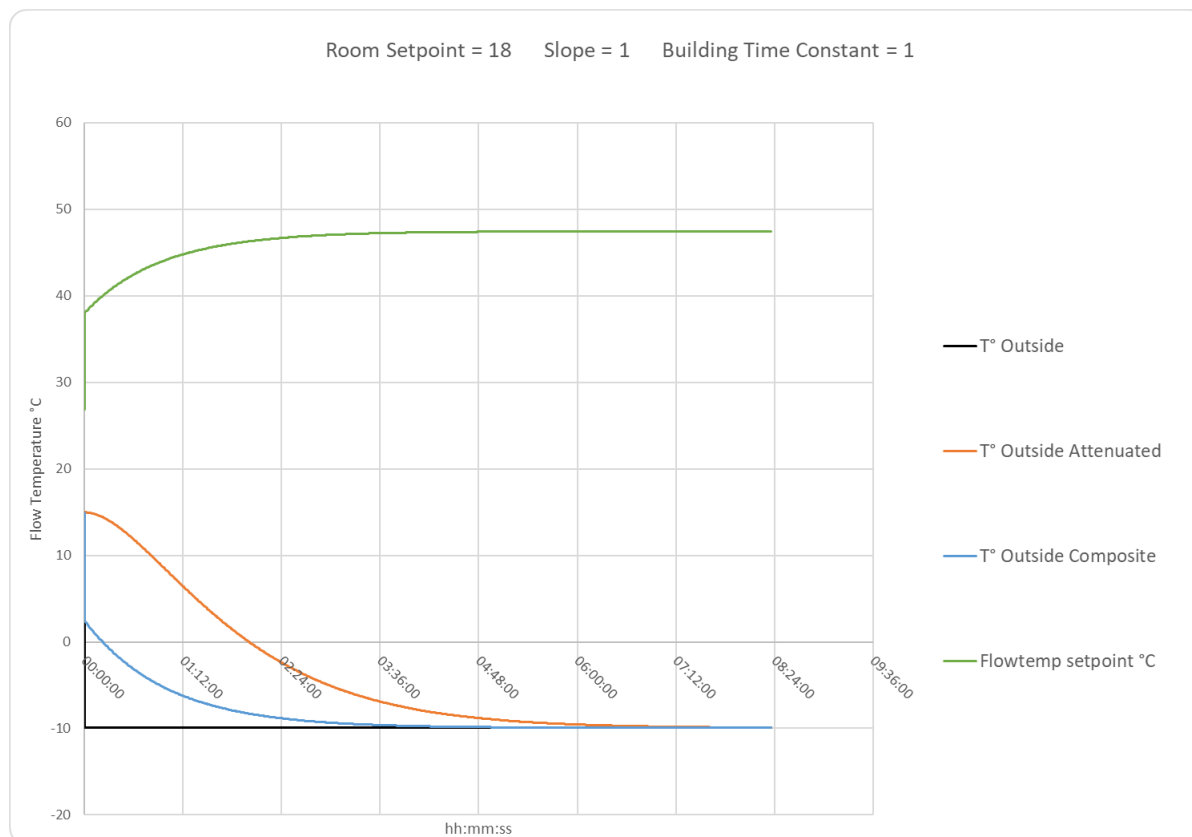


Figura 4.1: Primo test Tcomposite

momento del repentino calo di temperatura esterna (*quick setback*) vi è un "salto" anche nella temperatura esterna composta, dato dalla componente al 50% della temperatura esterna, mentre la rimanente parte ha un andamento attenuato che dopo un certo intervallo di tempo si assesta al valore di regime della temperatura esterna ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$), e rappresenta la seconda componente della formula (3.1), data dalla parte filtrata attraverso il *BCT*. Il calcolo della temperatura subito dopo il salto segue questa logica: la variazione di temperatura, in questo caso, è stata di 25° (da $+15^{\circ}$ a -10°), di conseguenza il 50% della variazione totale equivale a 12.5° . Infatti, il primo valore assunto dalla $T_{composite}$ dopo il *quick setback* è 2.5° (50% di 25°).

La variazione della temperatura esterna composita influisce sul calcolo della T_{flow} , che subisce anch'essa un rapido innalzamento, a fronte del rapido abbassamento di $T_{composite}$. Per quanto riguarda invece la $T_{attenuated}$, si nota come la componente attenuante sia molto maggiore, dal momento che viene calcolata in base alla temperatura esterna filtrata doppiamente con il BCT . Nel grafico 4.2 invece, è stata lanciata la

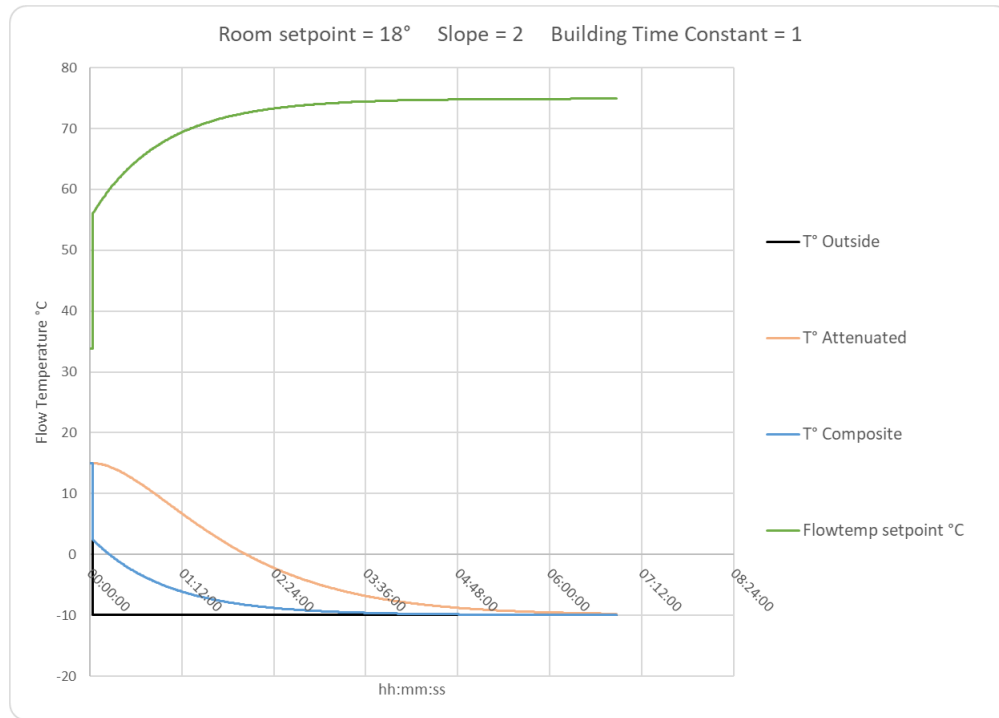


Figura 4.2: Secondo test Tcomposite

stessa simulazione ma con pendenza pari a 2. La differenza più significativa non si nota nell'andamento della $T_{composite}$, che resta invariato, ma quanto nella T_{flow} , che risulta essere molto maggiore, con un valore di regime intorno ai 75°, contro i 48° del caso precedente. Questo comportamento può essere spiegato facilmente osservando le curve di termoregolazione 3.6: a pendenze maggiori corrispondono valori di mandata maggiori.

Altre simulazioni sono state effettuate per poter caratterizzare meglio l'andamento della $T_{composite}$, invertendo il *quicksetback* da -5° a +10° di temperatura esterna (grafico 4.3, aumentando il BCT (grafici 4.4 e 4.5) rispettivamente a 5 e 20 h, e un ultimo test per indagare l'influenza del BCT sulla T_{flow} (grafico 4.6). All'inizio di ogni simulazione, la temperatura esterna è stata reimpostata su un valore di riferimento a seconda della simulazione scelta (solitamente su 15°), unitamente alla $T_{composite}$ e la $T_{attenuated}$. Imporre delle condizioni iniziali analoghe a tutte le temperature esterne ha consentito di identificare con precisione il comportamento della risposta e il successivo inseguimento del valore di regime.

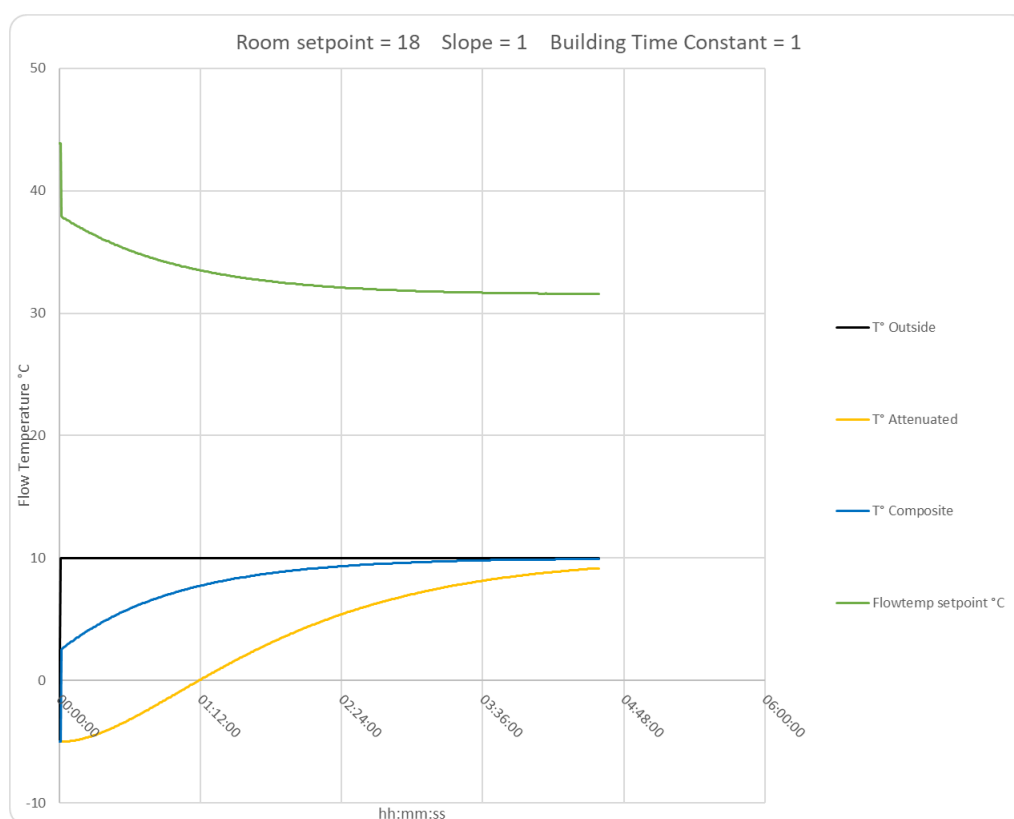


Figura 4.3: Terzo test Tcomposite

Dal grafico 4.4 è possibile osservare come, all'aumentare del BCT , il salto iniziale della $T_{composite}$ resti invariato mentre la restante parte appare molto meno reattiva. A causa della componente filtrante maggiore, il tempo impiegato sia dalla temperatura esterna composita, e di conseguenza dalla T_{flow} regolata sul valore di quest'ultima per arrivare al valore di regime è più prolungato. Questo trend è apprezzabile maggiormente nel caso 4.5, in cui dopo quasi due giorni, non è stato ancora raggiunto il regime permanente.

Da questi risultati si evince come aumenti il fattore filtrante all'aumentare del BCT , causando quindi un aumento più graduale della temperatura di mandata. Regolando questo parametro, è possibile quindi caratterizzare diversi edifici in base alla composizione costruttiva delle pareti, scegliendo risposte più o meno reattive (diminuendo o aumentando la costante di tempo dell'edificio).

4.1 Fase di test sul regolatore RVS61.843

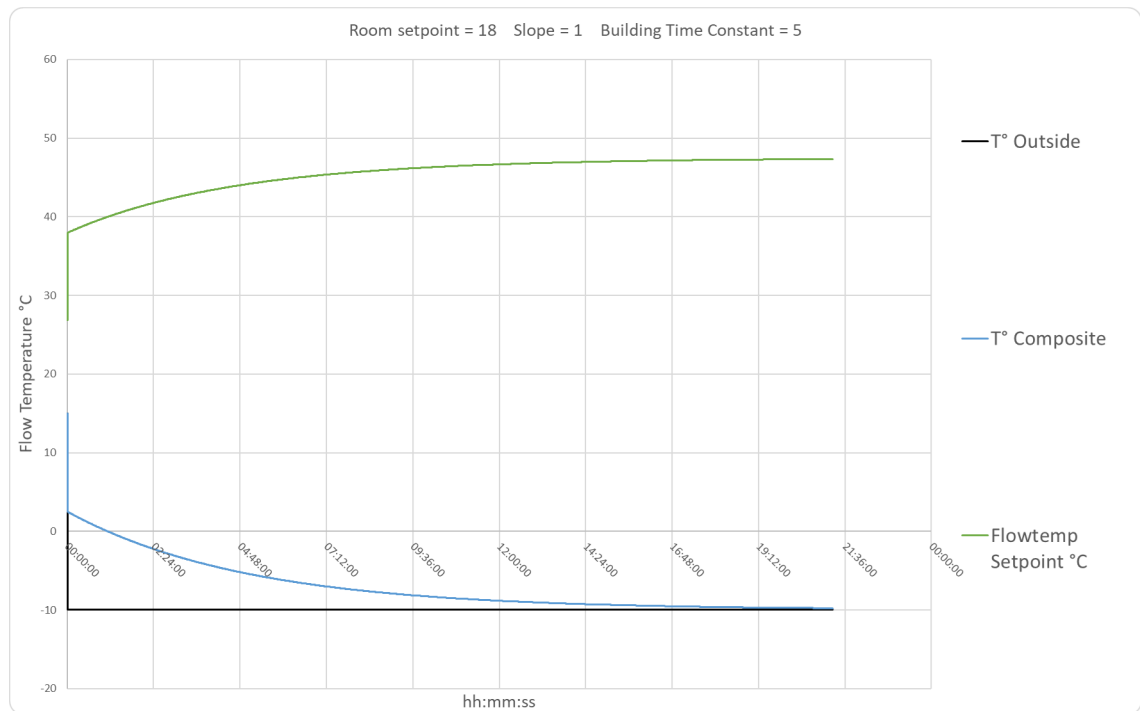


Figura 4.4: Quarto test Tcomposite

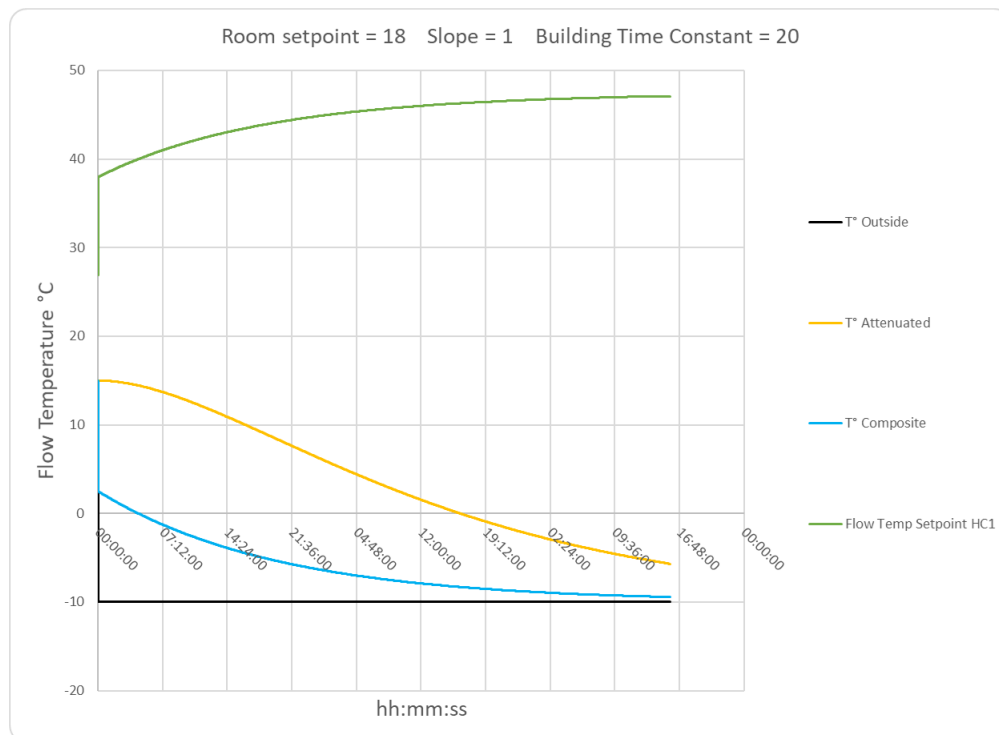


Figura 4.5: Quinto test Tcomposite

Un'ultima simulazione è stata svolta per indagare l'influenza del *BCT* sulla tempe-

ratura di mandata al variare del *Room setpoint* (4.6). In questo caso, si è partiti con una costante di tempo dell'edificio nulla e un setpoint ambiente di 28°. In seguito il setpoint è stato abbassato repentinamente fino a 16°, cui si è susseguito un brusco calo della temperatura di mandata. Successivamente questi valori sono stati riportati alle condizioni originali, mentre il *BCT* è stato attivato e settato a 1 h. A questo punto è stata ripetuta la procedura precedente, al fine di osservare se la costante di tempo influisse sulla mandata al variare del setpoint. Ciò che si evince è che non vi è questa dipendenza.

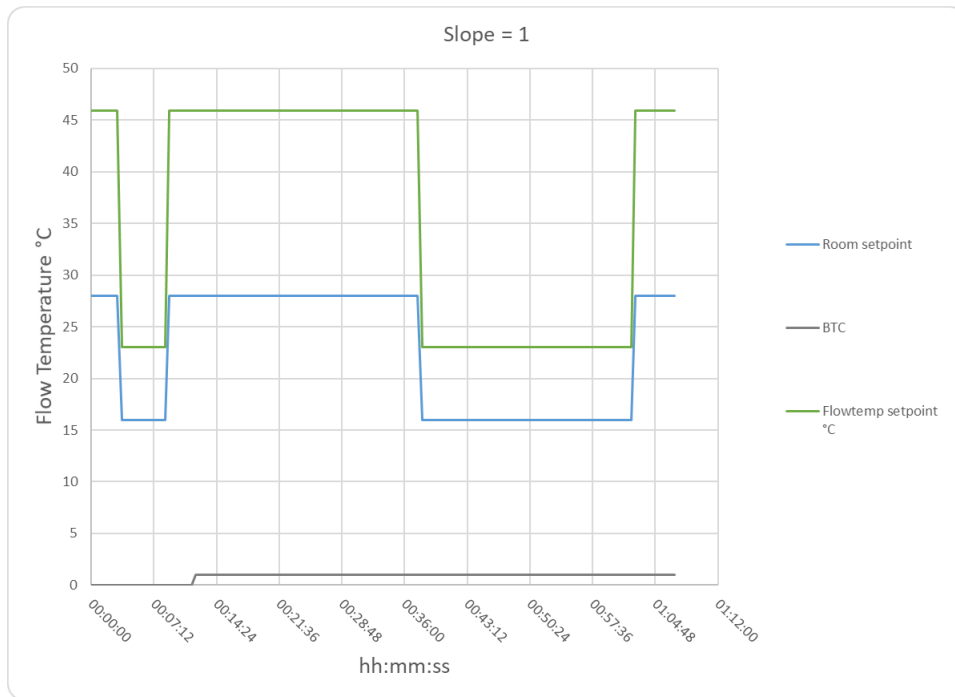


Figura 4.6: Influenza BCT su Tflow

4.2 Sintesi di una formula a tempo discreto della temperatura esterna composta

Terminati i test sul simulatore RVS e individuato il comportamento della temperatura esterna composta, la procedura è stata quella di modellare un filtro che restituisse l'andamento desiderato. Dopo una serie di test per tentativi, è stato appurato che l'azione del *BCT* è riconducibile ad un filtro passa basso del primo ordine con le seguenti caratteristiche:

- Frequenza di taglio $f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = 22500 \text{ Hz}$;
- Costante di tempo $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$;

L'azione di un filtro di questo tipo è stata sintetizzata e inserita in una formula di calcolo della temperatura esterna composita a tempo discreto:

$$t_{com} = t_{com_{prev}} - \left[(t_{out_{prev}} - t_{out}) \cdot 0.5 + (t_{fil_{prev}} - t_{fil}) \cdot 0.5 \right] \quad (4.1)$$

in cui:

- t_{com} : temperatura esterna composita al passo corrente;
- $t_{com_{prev}}$: temperatura esterna composita al passo precedente;
- t_{out} : temperatura esterna al passo corrente;
- $t_{out_{prev}}$: temperatura esterna al passo precedente;
- t_{fil} : temperatura esterna filtrata al passo corrente;
- $t_{fil_{prev}}$: temperatura esterna filtrata al passo precedente;

Mentre la temperatura esterna filtrata è definita come segue:

$$t_{fil} = t_{fil_{prev}} + (t_{out} - t_{fil_{prev}}) \left(1 - e^{\frac{-30}{3600 \cdot BCT}} \right)$$

L'ultimo termine è espressione della formula $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$, usata frequentemente nei sistemi dinamici e nei filtri elettronici per descrivere la risposta transitoria di un sistema del primo ordine (come un circuito RC o un filtro passa-basso) a un ingresso a gradino. In questo caso, τ rappresenta la costante di tempo del sistema, che indica quanto è veloce la risposta ai cambiamenti, e t è il tempo di campionamento, che nel caso della formula sopracitata è stato scelto di 30 secondi.

Il calcolo viene quindi iterato ad ogni passo, utilizzando sia informazioni memorizzate al passo precedente, sia informazioni nuove acquisite al passo corrente (come la temperatura esterna). Nel calcolo della temperatura filtrata infatti, al contenuto del passo precedente ($t_{fil_{prev}}$) viene sommato del contenuto innovativo ottenuto dall'azione del filtro.

4.3 Validazione della formula

Per la validazione è stato implementato un modello Simulink al fine di confrontare l'output della formula con i dati acquisiti durante le simulazioni su $T_{composite}$ e BCT attivo. Le stesse informazioni a disposizione sui log di ACS sono state importate nel workspace di MatLAB e usate come riferimento per osservare quanto fosse fedele la formula sintetizzata.

All'interno del blocco " $t_composite$ " (figura 4.7) è definita la formula di calcolo della temperatura esterna composita:

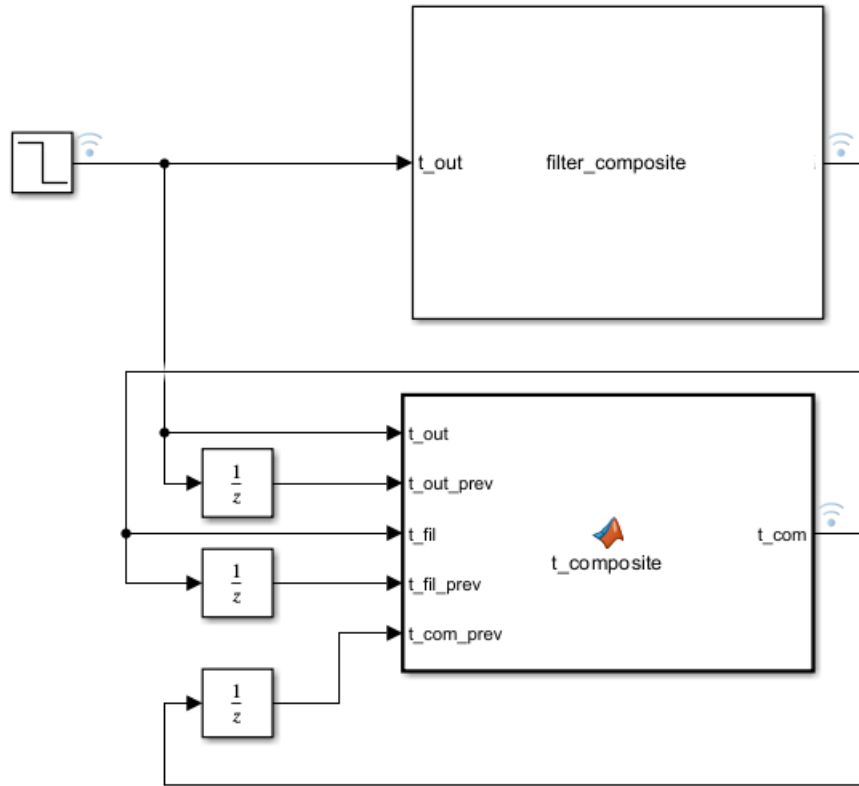


Figura 4.7: Modello di validazione $T_{composite}$

```
function [t_fil,t_com] = t_composite(t_out,t_out_prev,
    t_com_prev,t_fil_prev,~)

t_fil = t_fil_prev + (-t_fil_prev + t_out) * (1-exp
    (-30/(3600*BCT)));

t_com = t_com_prev - ((t_out_prev - t_out)*0.5 + (
    t_fil_prev - t_fil)*0.5);

end
```

Parallelamente, il blocco "*filter_composite*" contiene il modello del filtro passa basso definito precedentemente, e generato in Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), una piattaforma per la simulazione multidominio e la progettazione model-based di sistemi dinamici, basata sul linguaggio di modellazione open source Modelica. Nello specifico, il modello del filtro è stato importato in Simulink come FMU (Functional Mock-Up Unit), concetto centrale che rappresenta un componente fisico o logico di un sistema che può essere simulato e condiviso con altri ambienti di simulazione. FMU

4.3 Validazione della formula

è uno standard aperto per la modellazione e la simulazione di sistemi, che consente l'integrazione di modelli provenienti da diversi ambienti di sviluppo, come Dymola, Matlab/Simulink, o altri. Le FMU contengono un modello (ad esempio, un modello fisico di un motore o un controller di processo), insieme a tutte le informazioni necessarie per la sua simulazione, come le equazioni differenziali che lo descrivono, i parametri, le condizioni iniziali e gli eventuali dati di input.

La dinamica del filtro va a generare in output la temperatura esterna filtrata, su cui agisce l'influenza della costante di tempo dell'edificio. La temperatura esterna invece viene generata come un gradino di ampiezza variabile. Tutti questi input vengono indirizzati alla funzione principale "t_composite".

La validazione è stata basata su diverse simulazioni:

- Variazione di temperatura esterna a gradino da 15° a -10° e $BCT = 1, 5, 20$;
- Variazione di temperatura esterna dinamica con gradini multipli e $BCT = 1$;



Figura 4.8: Test 1 di validazione

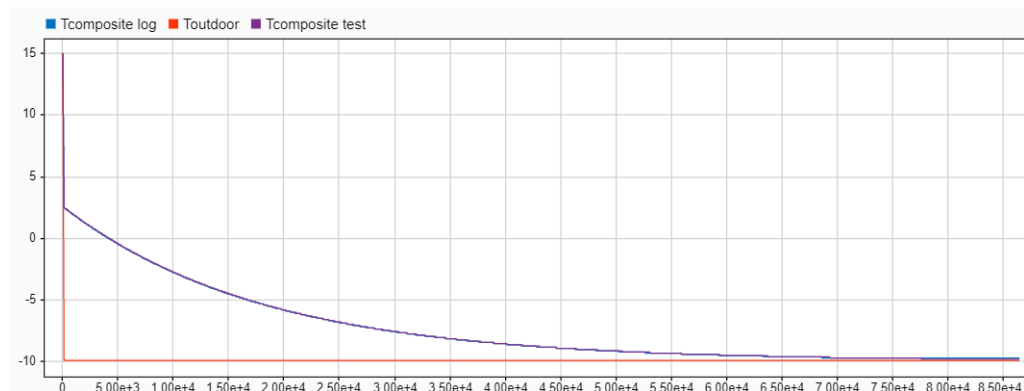


Figura 4.9: Test 2 di validazione

In tutti i casi è ben visibile come la $T_{composite}$ di test (output della formula) si sovrappone a quella di riferimento dei dati di log, confermandone l'esattezza.

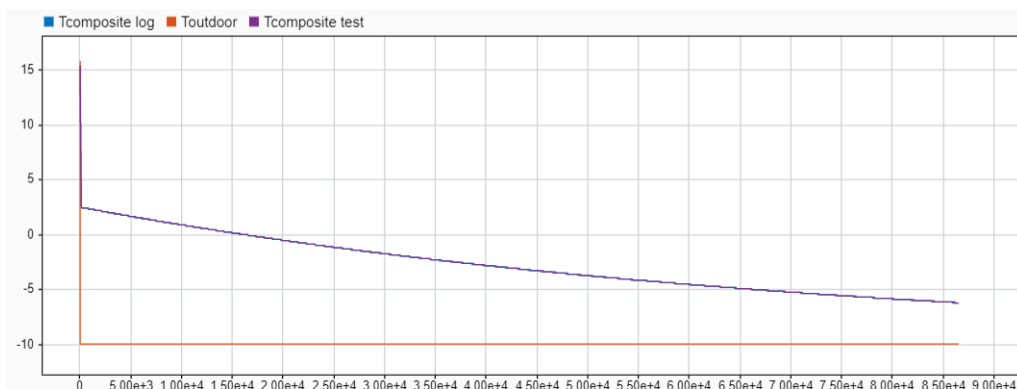


Figura 4.10: Test 3 di validazione

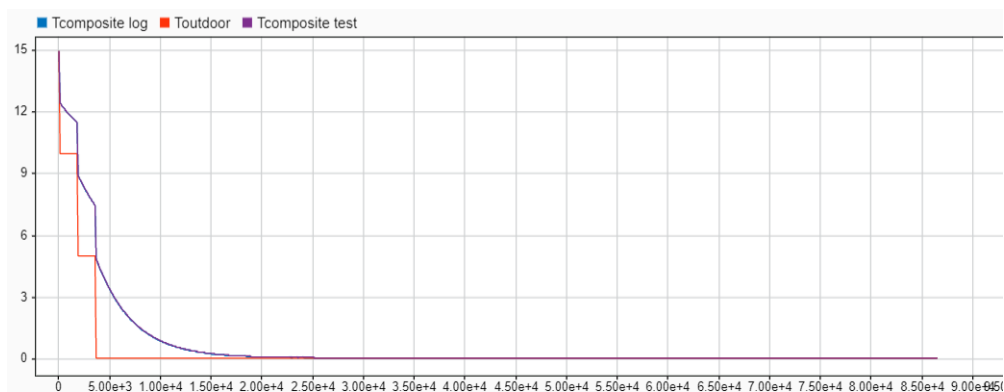


Figura 4.11: Test 4 di validazione

Capitolo 5

Simulazioni di termoregolazione Outdoor

5.1 Panoramica sul patrimonio edilizio nazionale

Al fine di introdurre il concetto di inerzia termica nelle simulazioni di termoregolazione outdoor, in particolare lo sfasamento termico, è stato necessario indagare lo stato dell'arte del patrimonio edilizio italiano, in modo da costruire modelli di edifici quanto più realistici e paragonabili al panorama edilizio nazionale. In quest'ottica, è stato condotto uno studio con l'obiettivo di individuare le principali caratteristiche geometriche tipiche degli edifici italiani, le tecniche costruttive impiegate nonché le proprietà termiche che ne caratterizzano l'involucro edilizio.

L'Italia è stato uno dei primi paesi a sensibilizzarsi sulle problematiche energetiche, già a partire dalla prima metà degli anni Settanta, sia a causa della scarsa disponibilità delle risorse (crisi energetica del '73), che delle problematiche legate al forte impatto sull'atmosfera e sull'ambiente dei prodotti della combustione. Fino al 1991 il contenimento dei consumi energetici negli edifici è stato regolamentato dalla Legge n. 373 del 30 aprile 1976, poi abrogata dalla Legge Quadro n. 10 del 1991, che nacque con lo scopo di razionalizzare l'uso dell'energia (relativamente al servizio di riscaldamento), promuovere lo sviluppo delle fonti rinnovabili e ridurre i consumi specifici di energia nei processi produttivi. La Legge 10/91 introdusse per la prima volta il concetto di certificazione energetica, che rappresenta oggi un importante strumento di azione e sensibilizzazione sulle problematiche del consumo energetico e della qualità energetica degli edifici. Al fine di rendere operativa la Legge Quadro 10/91, furono emanati diversi decreti di attuazione, tra i quali il D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 e successivamente il D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551. In particolare, il DPR 412/93 introdusse alcuni aspetti molto importanti, tra i quali:

- Classificazione del territorio italiano in sei zone climatiche (Figura 5.1);
- Classificazione degli edifici in funzione della loro destinazione d'uso;
- Introduzione e definizione di criteri di progettazione, quali il calcolo del fabbisogno di energia normalizzato (FEN) e del rendimento globale stagionale dell'impianto termico.

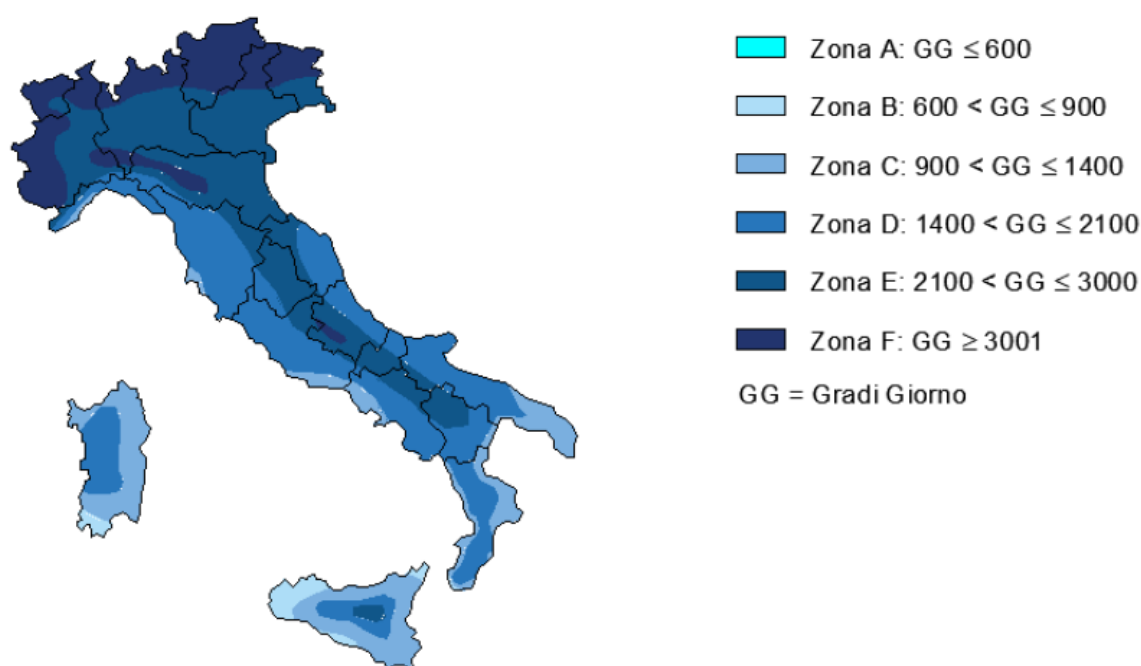


Figura 5.1: Suddivisione del territorio nazionale in 6 zone climatiche

In base ai dati Istat e al 15° censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011, l'Italia conta 14,452,680 edifici e 63,115 complessi di edifici. Gli edifici sono definiti come strutture indipendenti utilizzate stabilmente per residenze o per la produzione di beni e servizi, mentre i complessi di edifici comprendono costruzioni non residenziali destinate a un'unica entità.

La distribuzione regionale degli edifici e dei complessi mostra una concentrazione maggiore in Lombardia (oltre il 20% dei complessi) e in Sicilia e Lombardia (circa il 12% degli edifici). Altre regioni con significative concentrazioni di edifici includono Veneto, Piemonte, Puglia e Campania (oltre il 7%). Lazio, Emilia-Romagna e Veneto seguono per i complessi, rispettivamente con l'8.8%, 8.0% e 7.8%.

Circa l'84% degli edifici è residenziale, il 10% non residenziale e il 5.1% non utilizzato. Nei complessi di edifici, le destinazioni principali sono produttive (24.3%), servizi (23.7%) e commerciali (10.0%). Il 13.5% dei complessi non è utilizzato, essendo in cattive condizioni o in costruzione.

La nuova costruzione di edifici residenziali è aumentata del 16% rispetto al 2017, mentre quella di edifici non residenziali è cresciuta del 22% in media. Tuttavia, la maggior parte del patrimonio edilizio italiano è antecedente al 1990, con oltre l'85% degli edifici costruiti prima del 1991 e il 25% prima del 1945. Solo il 6.8% è stato costruito dopo il 2005, principalmente in Lombardia, Veneto, Lazio, Sicilia ed Emilia-Romagna.

5.1 Panoramica sul patrimonio edilizio nazionale

Gli edifici residenziali sono prevalentemente a due piani (50%), seguiti da quelli a tre piani (24%), un piano (17%) e quattro o più piani (10%). La tipologia edilizia predominante è la muratura portante (57.2%), seguita dal calcestruzzo armato (29.5%).

La maggior parte degli edifici ha una superficie utile compresa tra 60 e 120 m², con variazioni minime tra le diverse aree geografiche. Lombardia, Veneto, Piemonte, Emilia-Romagna, Toscana, Lazio, Campania e Sicilia presentano le percentuali più alte di edifici con superficie utile maggiore di 150 m². Le case unifamiliari hanno una superficie media di 154.1 m², mentre le case a schiera 113.8 m², e quelle in linea e a torre rispettivamente 85.2 m² e 74.1 m².

Le tipologie edilizie più comuni sono la casa unifamiliare, la casa a schiera, la casa in linea e la casa a torre. La casa unifamiliare e quella a schiera mantengono costanti i loro due piani nel tempo, mentre la casa in linea e quella a torre mostrano variazioni significative, con la casa a torre che raggiunge un picco di 8 piani tra il 1961 e il 1976.

Il rapporto tra la superficie disperdente e il volume lordo riscaldato (S/V) è maggiore per le case unifamiliari e a schiera, con un trend decrescente nel tempo. La dimensione media delle finestre, importante per l'efficienza energetica, è regolata dal requisito minimo del fattore luce diurna, con valori medi nazionali stabili intorno a 3.29 m².

L'analisi di svariati dati presenti in letteratura ha permesso di evidenziare come la maggior parte del costruito italiano si trovi prevalentemente in specifiche regioni e comuni che ricadono all'interno delle zone climatiche D, E e F. Questo dato giustifica il fatto che molti studi condotti in precedenza abbiano prevalentemente considerato queste zone climatiche per la stima delle caratteristiche termiche dei diversi componenti opachi e trasparenti. In relazione alle caratteristiche tipiche degli edifici italiani, i quali sono prevalentemente massivi, considerando l'evoluzione storica della normativa in ambito energetico e l'evoluzione delle tecniche costruttive, si sono individuate 7 macro-famiglie di componenti opachi verticali (Tabella 5.1). Per alcune di queste tipologie, sono state definite anche alcune delle varianti più comuni, quali, ad esempio, la presenza o meno di un'intercapedine d'aria. Si precisa che tutte le tipologie adottate sono attribuibili sia ad edifici residenziali che non residenziali. Le tipologie costruttive evidenziate sono caratteristiche di specifici periodi di costruzione, pertanto possono non prevedere alcun tipo di isolamento o al contrario essere caratterizzate da un elevato livello di coibentazione. Le tipologie quali muratura in pietra, muratura a sacco, muratura a cassa vuota, risalgono prevalentemente a prima degli anni 30', pertanto sono strutture tipicamente non isolate. Le pareti in laterizio, così come quelle in calcestruzzo, invece, sono caratteristiche di un periodo di costruzione molto ampio che va dal 1930 fino ai giorni nostri, pertanto possono essere

N.	Tipologia	Materiale	Intercapedine d'aria	Nomenclatura
1	Muratura	pietra	no	muratura in pietra
		mattoni	no	muratura in mattoni
		calcestruzzo	no	muratura in calcestruzzo
2	Muratura a sacco	mattoni	no	muratura a sacco in mattoni
3	Muratura a cassa vuota	pietra	sì	muratura a cassa vuota in pietra
		mattoni	sì	muratura a cassa vuota in mattoni
4	Parete di tamponamento	calcestruzzo	sì	parete in calcestruzzo
		laterizio forato	no	parete con forati
		laterizio forato	sì	parete a cassetta
		laterizio	no	parete con paramento in mattoni
		laterizio	sì	parete con paramento in mattoni - 2
		laterizio-pietra	no	parete con paramento in pietra
		laterizio-pietra	sì	parete con paramento in pietra - 2
		blocco termico	no	parete con blocco termico
5	Parete leggera	variabile	no	parete leggera
6	Parete ventilata	variabile	no	parete ventilata
7	Parete verde	variabile	no	parete verde

Tabella 5.1: Tipologie di pareti con materiali e nomenclature

caratterizzate da spessori e livelli di isolamento termico molto variabili. Infine, le pareti leggere, maggiormente utilizzate nelle nuove e recenti costruzioni, sono pareti caratterizzate da spessori molto ridotti ma da un livello di isolamento molto elevato. Il livello di isolamento termico è stato assegnato per ogni tipologia di parete studiata, riportate tabella 5.1, in funzione dei periodi di costruzione considerati tipici per la stessa. In particolare, sono state considerate le seguenti configurazioni di isolamento:

1. Pareti non isolate: pareti costruite prima della Legge n.373 del 76;
2. Pareti scarsamente isolate: pareti costruite a seguito della prima normativa in ambito energetico (periodo 1976-1991) e caratterizzate da un isolamento termico di piccolo spessore (ipotizzato pari 2 cm);
3. Pareti mediamente isolate: pareti costruite a partire dagli anni 90' (a seguito della Legge 10/91) caratterizzate da un isolamento termico di medio spessore (ipotizzato pari a 5 cm);
4. Pareti isolate: pareti realizzate successivamente al Decreto Legislativo del 2005 con uno spessore dell'isolamento termico di circa 10 cm;
5. Pareti altamente isolate: pareti realizzate successivamente al D.M. del 2015 contraddistinte da uno spessore dell'isolamento termico molto elevato (maggiore di 14-16 cm).

I periodi di costruzione e i livelli di isolamento assunti sono riportati in Tabella 5.2. Oltre agli spessori, il comportamento termico del pacchetto edilizio è fortemente influenzato anche dal tipo di materiale. Le murature in pietra, ad esempio, possono presentare, a parità di spessore, delle prestazioni termiche completamente diverse a seconda che siano realizzate con blocchi di pietra o di tufo, le cui caratteristiche possono variare significativamente anche in funzione del territorio di formazione. Le

5.1 Panoramica sul patrimonio edilizio nazionale

Codice parete	Nomenclatura	Periodo
1	muratura in pietra	≤ 1920
2	muratura in mattoni	1900-1950
3	muratura in calcestruzzo	1950-1975
4	muratura a sacco in mattoni	≤ 1930
5	muratura a cassa vuota in pietra	1900-1975
6	muratura a cassa vuota in mattoni	1930-1975
7	parete in calcestruzzo	1976-1990
8	parete con forati	1930-1975
9	parete a cassetta	≥ 1976
10	parete con paramento in mattoni	≥ 1976
11	parete con paramento in mattoni - 2	≥ 1976
12	parete con paramento in pietra	≥ 1976
13	parete con paramento in pietra - 2	≥ 1976
14	parete con blocco termico	≥ 2000
15	parete leggera	≥ 2000

Tabella 5.2: Tipologie di pareti con nomenclature e periodi

prestazioni termiche dei laterizi risentono fortemente della tipologia di argilla, del mix di materie prime mescolate nell'impasto (come ad esempio farina di legno) e, nel caso dei forati, della percentuale di foratura con cui sono realizzati. Discorso analogo vale per gli isolanti, i quali presentano prestazioni termiche più o meno performanti a seconda che siano di tipo naturale (vegetale, animale o minerale) o sintetica (derivati dal petrolio). Nel presente lavoro, al fine di definire delle caratteristiche termiche medie rappresentative del parco edilizio italiano, valendosi dell'esperienza e del supporto di dati presenti in Letteratura, per ogni materiale considerato (Tabella 5.3) sono stati calcolati e considerati dei valori standard medi della conducibilità termica, densità e calore specifico. A ciascun materiale è inoltre riportato, inoltre, il codice numerico associato al componente verticale (Tabella 5.1) per il quale questo è stato utilizzato. Relativamente alla resistenza termica dell'intercapedine d'aria, invece, è stato fatto riferimento alla norma UNI 6946 [19]. A partire dai materiali e dalle tipologie di pareti individuate, sono state quindi definite delle possibili stratigrafie, a seconda delle quali sono stati riportati i principali parametri che influenzano il comportamento termico invernale ed estivo dei componenti opachi, quali: spessore (s), massa superficiale (M_s), trasmittanza termica (U), fattore di attenuazione (fd), sfasamento (ϕ) e trasmittanza termica periodica (ψ).

I valori calcolati di ciascun parametro sono riportati in appendice 2 per ognuna delle 15 tipologie di pareti individuate. Si precisa che, relativamente alle pareti isolate, i valori riportati nelle tabelle rappresentano i valori medi delle 2 o più configurazioni ipotizzate (ad esempio tipo di isolante diverso ma di uguale spessore). Tutti i risultati sono riportati al variare dello spessore ipotizzato, della configurazione di isolamento adottata e della stratigrafia della parete assunta (riportata graficamente nelle stesse

Parete	Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/(m K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg K]
da 1 a 15	intonaco	0.02	0.7	1500	1000
1, 5, 12, 13	pietra	0.16-0.80	2.40	2500	1000
3 e 7	calcestruzzo	0.20-0.80	1.70	2400	1000
15	cartongesso	0.012	0.21	900	1000
da 8 a 13	forato - 1	0.15	0.333	760	840
da 8 a 13	forato - 2	0.25	0.305	755	840
14	Blocco termico	0.30	0.223	550	1000
14	Blocco termico - EPS	0.30	0.065	≈ 550	≈ 1000
10 e 11	mattoni pieni	0.12-0.80	0.78	1800	840
Da 1 a 14	isolante - 1	0.02-0.14	0.045	100	840
da 1 a 14	isolante - 2	0.02-0.14	0.040	30	1250
15	Isolante - 3	0.02-0.14	0.043	90	1000
15	Isolante - 4	0.02-0.14	0.038	175	840

Tabella 5.3: Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache verticali

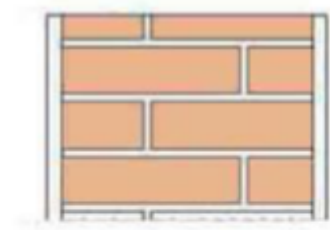
tabelle).

5.2 Modelli Dymola degli edifici

Sulla base della ricerca effettuata in merito al patrimonio edilizio Nazionale, sono stati selezionati 4 modelli di edifici per simulazioni con inerzia termica, disponibili nelle librerie della licenza Dymola aziendale:

- Edificio classe 1 (5.2): costruzione degli anni 70'/80', con muratura in intonaco esterno, mattone pieno ed intonaco interno;
- Edificio classe 2 (5.3): costruzione degli anni 90', con stratigrafia costituita da intonaco esterno, primo strato di mattone forato, intercapedine d'aria, strato di isolante, secondo strato di mattone forato e intonaco interno;
- Edificio classe 3 (5.4): costruzione dei primi anni 2000' con intonaco esterno, isolante, doppio strato di mattone forato e intonaco interno;
- Edificio classe 4 (5.5): costruzione moderna degli anni dopo il 2010, con intonaco esterno, pannello isolante EPS 120, mattone in muratura e intonaco in gesso interno;

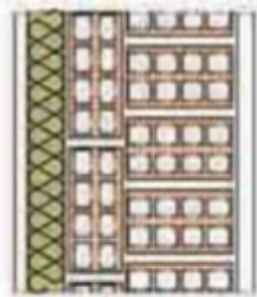
Per ogni stratigrafia sono riportati anche le caratteristiche termiche principali, come spessore (in metri), conducibilità termica (W/mK), calore specifico ($J/(kgK)$) e densità (kg/m^3).



Geometrical and thermal characteristics							
N	Description	x [m]	k [W/(mK)]	c [J/(kg K)]	d [kg/m ³]	absIR [-]	absSol [-]
1	External plaster	0.02	0.90	1000	1800	0.9	0.6
2	Solid brick	0.38	0.84	1000	1800	-	-
3	Internal plaster	0.02	0.70	1000	1400	0.9	0.6

$$U = 1.49 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Figura 5.2: Edificio classe 1



Geometrical and thermal characteristics							
N	Description	x [m]	k [W/(mK)]	c [J/(kg K)]	d [kg/m ³]	absIR [-]	absSol [-]
1	External plaster	0.01	0.90	1000	1800	0.9	0.6
2	Insulation	0.06	0.034	1442	34	-	-
3	Hollow brick	0.08	0.5	1000	800	-	-
4	Hollow brick	0.25	0.5	1000	800	-	-
6	Internal plaster	0.02	0.70	1000	1400	0.9	0.6

$$U = 0.38 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Figura 5.4: Edificio classe 3

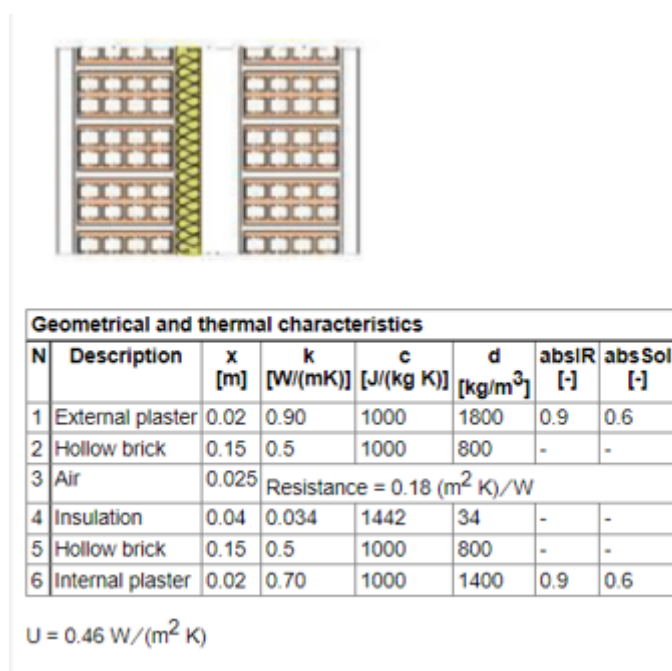


Figura 5.3: Edificio classe 2

Information

Masonry brick with insulation

Geometrical and thermal characteristics							
N	Description	x [m]	k [W/(mK)]	c [J/(kg K)]	d [kg/m ³]	absIR [-]	absSol [-]
1	Exterior plaster	0.005	0.300	840	1300	0.9	0.6
2	EPS 120 thermal insulation panel	0.1	0.034	1250	23	-	-
3	Masonry brick	0.3	0.207	840	750	-	-
4	Gypsum plaster	0.02	0.570	1000	1300	0.9	0.6

$$U = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

Figura 5.5: Edificio classe 4

La trasmittanza termica è nota per tutti gli edifici, tuttavia, per lanciare le simulazioni con influenza dello sfasamento termico, è stato necessario calcolare quest'ultimo con lo strumento software *Termus-Glaser*.

Termus-G, sviluppato da ACCA Software, consente di effettuare valutazioni sulle prestazioni energetiche e di inerzia termica di innumerevoli tipologie di edifici. Tra le peculiarità più rilevanti è presente una vasta libreria di materiali edili, con i quali è possibile creare stratigrafie murarie altamente personalizzate. Inoltre, una

volta definita la costituzione della parete, è possibile ottenere una scheda riassuntiva in cui sono indicati i parametri caratteristici di quest'ultima, sfasamento termico compreso.

L'utilizzo del software ha consentito il calcolo dello sfasamento termico mediante la riproduzione nel software delle medesime tipologie di edifici modellate su Dymola. Nelle immagini 5.6 e 5.7 sono riportati gli esempi degli edifici di classe 1 e 4, in cui è visualizzabile anche l'interfaccia grafica di Termus-G. Gli elementi della stratigrafia vengono selezionati da apposite librerie (differenziate in base ai materiali edilizi) e aggiunte al modello, specificando tutte le caratteristiche termiche e lo spessore viste in precedenza.

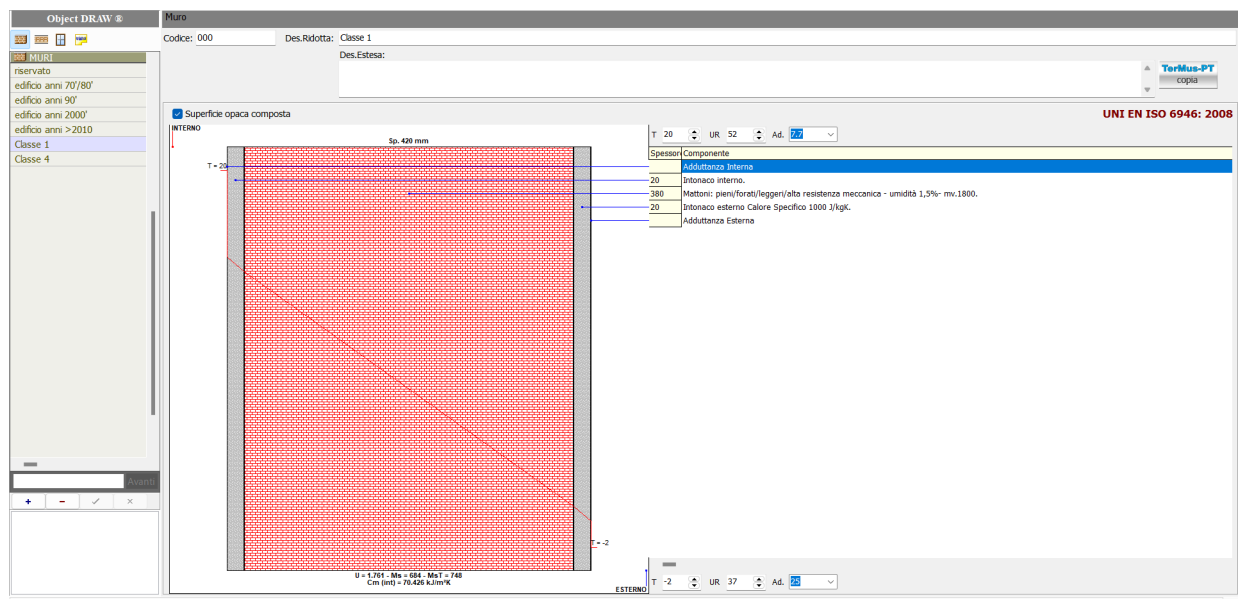


Figura 5.6: Configurazione edificio classe 1 Termus-G

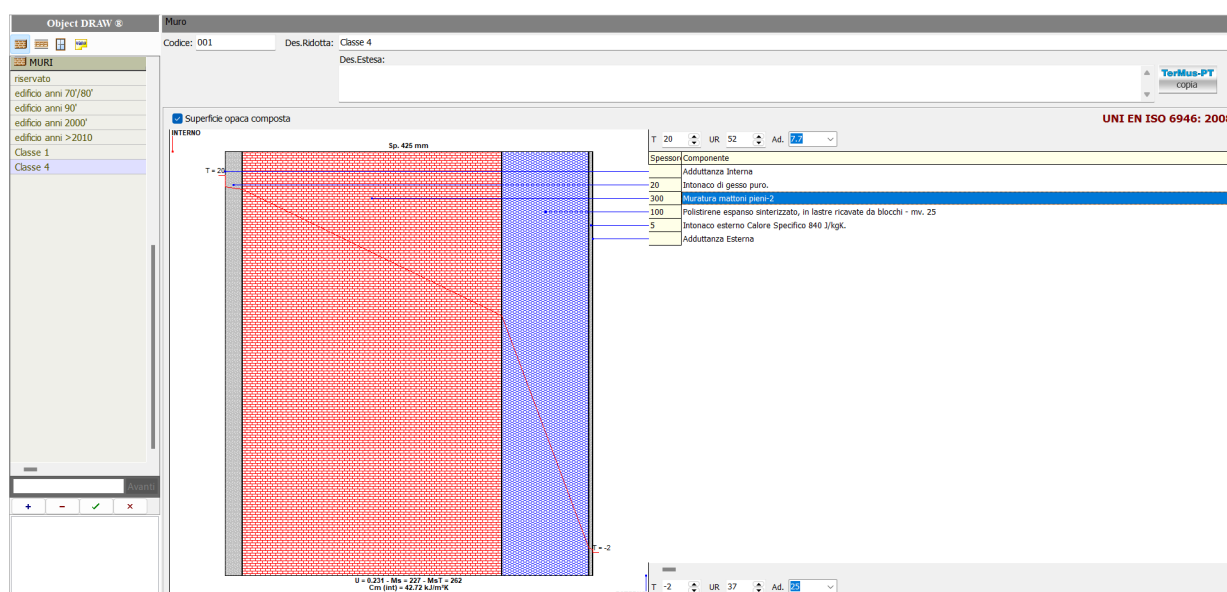


Figura 5.7: Configurazione edificio classe 4 Termus-G

Una volta definite le stratigrafie, viene stampato un resoconto sulle prestazioni energetiche ed inerzia termica della struttura verticale opaca mediante apposito comando. I risultati del calcolo dello sfasamento termico sono rappresentati nella tabella 5.4. Come si può notare, i valori non si discostano eccessivamente tra di

Classe edificio	Sfasamento termico Termus-G [h]
1 (anni 70'/80')	13.6
2 (anni 90')	11.8
3 (anni 2000')	10.8
4 (anni > 2010)	14.2

Tabella 5.4: Sfasamento termico calcolato in TerMus-G delle 4 classi di edificio

loro, nonostante le epoche costruttive diverse. Si osserva inoltre che i fattori che influiscono maggiormente sullo sfasamento termico di una parete sono la densità del materiale e lo spessore di quest'ultimo. Di conseguenza, a pareti più spesse sono associati valori di sfasamento maggiori.

5.3 Modello MatLAB/Simulink

Per il lancio delle simulazioni di termoregolazione outdoor sono stati implementati uno script MatLAB e un modello Simulink.

Nello script vengono definiti una serie di parametri e variabili necessari al corretto funzionamento dello schema di controllo simulink:

- *time_sim*: tempo di simulazione. E' stata scelta una durata di 10 giorni per tutte le simulazioni;
- *t_samp*: tempo di campionamento pari a 30 secondi;
- *Zone_i_slope*: pendenza della curva Ariston;
- *Global_outdoor_temp*: temperatura esterna utilizzata come input al modello;
- *Zone_i_Offset_Temp*: offset applicato alla curva Ariston per lo shifting verticale;
- *Zone_i_Min_Temp*: temperatura minima di esercizio dell'emettitore di zona;
- *Zone_i_Max_Temp*: temperatura massima di esercizio dell'emettitore di zona;
- *Zone_i_Room_influence*: parametro impiegato nelle formule di termoregolazione Ariston nel caso di regolazione indoor (non impiegato in questo caso di studio);
- *TR_mode*: metodo di selezione della logica Ariston di termoregolazione (0 outdoor, 1 indoor, 2 indoor+outdoor);
- *offset*: offset verticale applicato alle curve Siemens;
- *curves_Logic*: in base a questo valore (1 o 0) un selezionatore (*switch*) nel modello Simulink indirizza la termoregolazione verso la logica Ariston o Siemens;
- *slope*: pendenza della curva Siemens;
- *BCT*: costante di tempo dell'edificio utilizzata nella logica Siemens;

Questi parametri vengono salvati nell'ambiente di lavoro (*workspace*) MatLAB al lancio dello script, che è interconnesso con il modello Simulink. Il valore delle variabili quindi è stato modificato direttamente dal codice, senza dover modificare manualmente i blocchi del modello.

Procedendo per ordine, nel modello sono state implementate sia la logica di termoregolazione Ariston che quella Siemens. Per quanto riguarda quest'ultima, i punti cardine principali sono le curve non lineari (approfondite in 3) e la formula di calcolo della temperatura esterna composita quando la costante di tempo è attiva.

Per quanto riguarda invece la logica Ariston, le curve utilizzate sono state introdotte in 3.5, la formula di calcolo che produce il riferimento per il regolatore è le seguente:

$$T_{set_{zone_i}} = Zone_i \text{ Min Temp} + Zone_i \text{ Slope} * (Tr_{Set_{zone_i}} - Global \text{ Outdoor Sensor}) + Zone_i \text{ Offset Temperature} \quad (5.1)$$

in cui:

- $T_{set_{zone_i}}$: temperatura di mandata calcolata per la richiesta di calore;
- $Zone_i \text{ Min Temp}$: temperatura di esercizio minima necessaria l'emettitore per scaldare l'ambiente;
- $Zone_i \text{ Offset Temperature}$: offset calcolato per la curva di termoregolazione;
- $Tr_{Set_{zone_i}}$: Room setpoint impostabile dall'utente (range 10-30);
- $Global \text{ Outdoor Sensor}$: temperatura esterna simulata (nei casi reali viene misurata da una sonda esterna);
- $Zone_i \text{ Slope}$: pendenza della curva di termoregolazione;

La temperatura di esercizio minima si differenzia in base al tipo di emettitori della zona, con un range di 30-82 °C per zone con radiatori (HT Zone) e 20-45 °C per le zone con riscaldamento a pavimento (LT Zone). Gli offset sono regolabili, anche in questo caso in base alla zona, con -14/+14 °C per zone HT e -7/+7 °C per zone LT. Infine lo slope va da 0.4 a 3.5 per zone HT e da 0.2 a 1 per zone LT.

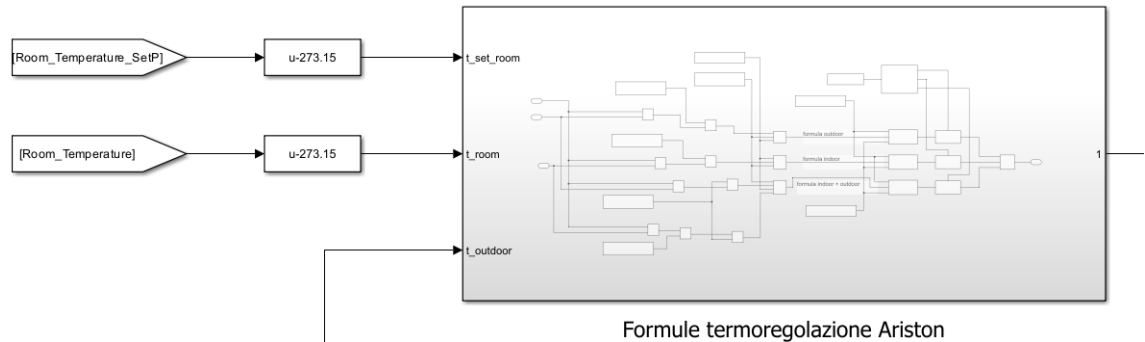


Figura 5.8: Logica di termoregolazione Ariston

La seguente formula è stata implementata nel blocco Simulink in figura 5.8, insieme ad altre due formule, rispettivamente per la modalità di termoregolazione *indoor* e *indoor + outdoor*. Queste ultime sono state implementate per completezza ma non verranno approfondite dal momento che non sono state impiegate nella termoregolazione. Le formule (figura 5.9) convergono tutte in un blocco *merge*, che lascia passare solo il risultato della formula specificato nello script MatLAB attraverso il parametro TR_mode .

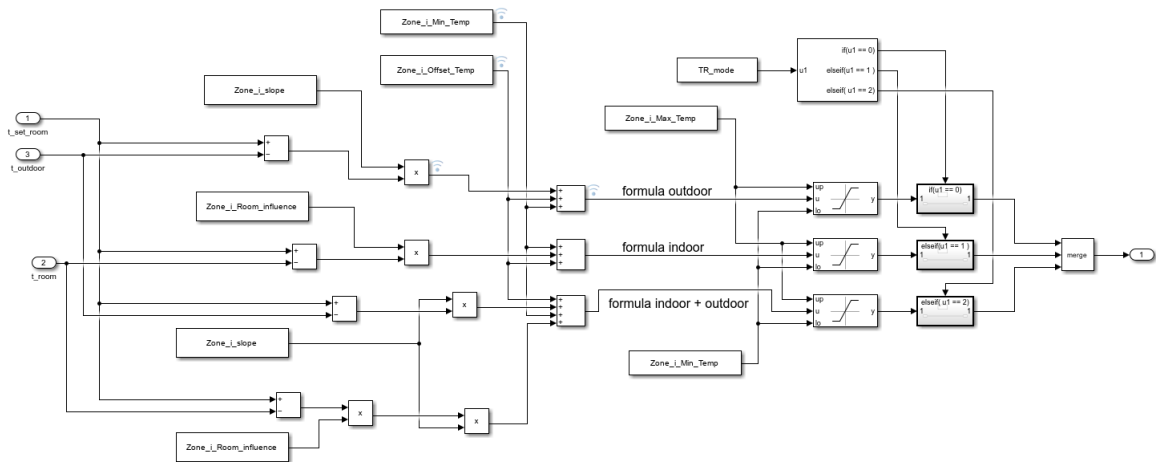


Figura 5.9: Formule di termoregolazione Ariston

La logica di termoregolazione Siemens invece (figura 5.10) si compone di 3 parti principali:

- Blocco condizionale sul BCT: questo blocco, costituito da una condizione *if*, imposta la termoregolazione sulla temperatura esterna composta se la costante di tempo dell'edificio è $\neq 0$, sulla temperatura esterna classica in caso contrario.
- Blocco di calcolo della temperatura esterna composta: qui viene calcolata la $T_{composite}$ in tempo reale durante la simulazione, secondo la formula 3.1.
- Blocco di applicazione della curva di termoregolazione: in questa fase, come preventivamente illustrato in 3.10, a seconda dei parametri impostati (slope, room setpoint, temperatura esterna ed eventuale offset), viene calcolata la curva di termoregolazione e la temperatura di mandata dell'impianto.

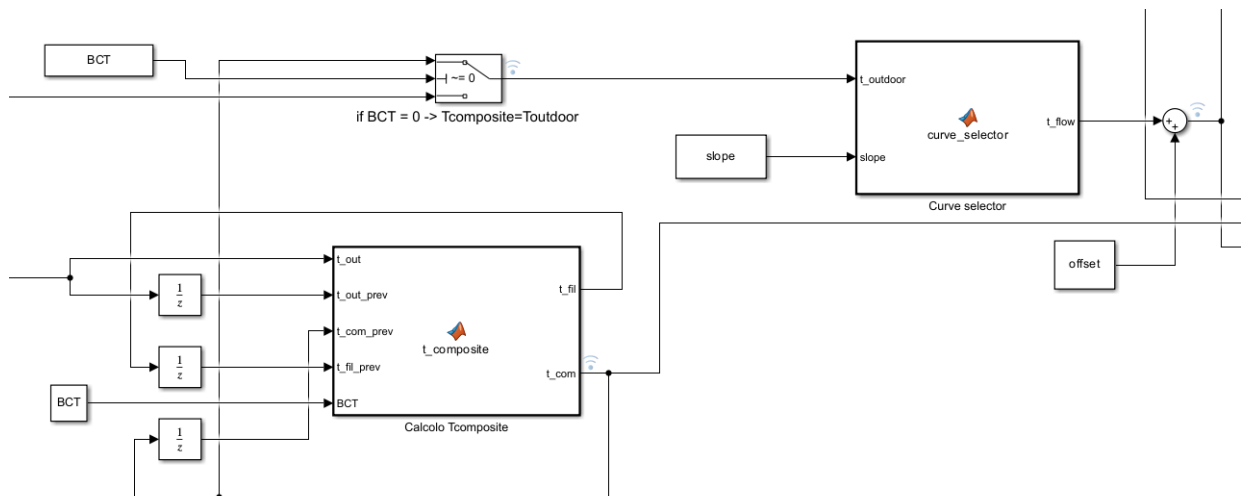


Figura 5.10: Logica di termoregolazione Siemens

Successivamente, come mostrato in figura 5.11, è presente il blocco FMU della zona da riscaldare che riceve in input il CH_target , ovvero il riferimento desiderato di temperatura di mandata, la temperatura esterna ed una serie di segnali che si intende monitorare ($T_{composite}$, T_{flow} , $T_{outdoor}$). Questo modello, generato in Dymola, presenta alcune caratteristiche termiche peculiari di diversi edifici, che verranno approfondite nella fase di pianificazione delle simulazioni. Il blocco "logica di termoregolazione" ha il compito di selezionare, in base al valore del parametro $curves_logic$, l'output della termoregolazione. Da ciò si evince che non è possibile lanciare simulazioni con entrambe le logiche selezionate, ma devono essere svolte singolarmente. Infine, in uscita dal blocco FMU è presente il risultato della simulazione, con una molteplicità di segnali che verranno approfonditi in fase di studio dei risultati.

L'input principale del modello è la temperatura esterna, che in questo progetto di tesi è stata variata, a seconda della necessità, tra un valore costante e una sinusoidale di ampiezza 10. I vari use cases sono stati definiti in fase di pianificazione delle simulazioni.

I blocchi che precedono l'FMU in figura 5.11, ma presenti anche in altre parti del modello, sono necessari per convertire la temperatura da gradi Kelvin a gradi Celsius, sommando all'ingresso che ricevono la costante 273.15.

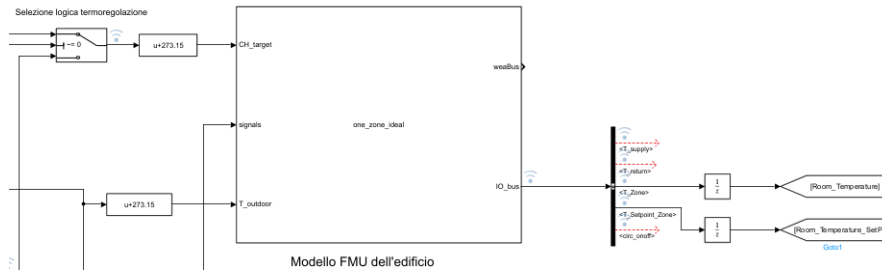


Figura 5.11: Blocco FMU e Output modello Simulink

5.4 Simulazioni di termoregolazione Outdoor con confronto tra approccio Ariston e Siemens

Una volta messo a punto il modello simulink con le logiche di termoregolazione implementate, sono stati definiti degli use cases di simulazione per confrontare l'approccio Ariston/Siemens. L'obiettivo di suddette simulazioni esplorative è stato quello di mettere in luce eventuali vantaggi o svantaggi delle due configurazioni, evidenziandone le caratteristiche principali.

Le simulazioni sono state divise in due blocchi, uno per la logica Ariston e uno per quella Siemens. Per quanto riguarda la configurazione della zona termica, in

5.4 Simulazioni di termoregolazione Outdoor con confronto tra approccio Ariston e Siemens

entrambi i casi sono state scelte e mantenute le medesime condizioni, elencate di seguito:

- Zona senza occupation: il concetto di "occupation" si riferisce alle persone presenti nella zona termica, che inevitabilmente conferiscono un apporto di calore all'ambiente. In questo caso questa dinamica non è stata modellata.
- Zona senza irraggiamento: sono stati trascurati tutti gli apporti di calore alla zona provenienti dall'irraggiamento solare.
- Edificio monozona di 175 m².
- Setpoint ambiente (*room setpoint*) = 20 °C.
- Generatore di calore ideale: i modelli degli edifici Dymola sono caratterizzati da un generatore in grado di cedere quasi istantaneamente la temperatura di mandata desiderata (CH_target).

	Simulazioni curve Ariston			
Nome simulazione	Sim1 LT	Sim2 LT	Sim3 LT	Sim8 LT
Toutdoor	-5 °C costante	+5 °C costante	+10° -10° su 24h	+10° -10° su 24h
Tipo di edificio	anni 2000'	anni 2000'	anni 2000'	>2010
Tipo di emettitori	pavimento	pavimento	pavimento	pavimento
Building time constant	/	/	/	/
Tipo di curva	Curva Ariston	Curva Ariston	Curva Ariston	Curva Ariston
Comportamento nominale impianto	Curva Ariston slope 0.3 + offset 1° Underfloor heating 34°/29° Room temp = 20° Portata = 1260 l/h	Curva Ariston slope 0.3 + offset 1° Underfloor heating 31°/26° Room temp = 20° Portata = 864 l/h	Curva Ariston slope 0.3 + offset 1.5° Zone_i min temp = 25° Zone_i max temp = 45°	Curva Ariston slope 0.3 + offset 5° Zone_i min temp = 20° Zone_i max temp = 45°
Nome simulazione	Sim1 HT	Sim2 HT	Sim3 HT	Sim8 HT
Toutdoor	-5 °C costante	+5 °C costante	+10° -10° su 24h	+10° -10° su 24h
Tipo di edificio	anni 2000'	anni 2000'	anni 2000'	anni 70'/80'
Tipo di emettitori	termosifoni	termosifoni	termosifoni	termosifoni
Building time constant	/	/	/	/
Tipo di curva	Curva Ariston	Curva Ariston	Curva Ariston	Curva Ariston
Comportamento nominale impianto	T° mandata 70° T° ritorno 60° Room temp = 20° Portata = 563.4 l/h	T° mandata = 58° T° return 48° Room temp = 20° Portata = 356.4 l/h	Curva Ariston slope 1.2 (no offset) Zone_i min temp = 40° Zone_i max temp = 82°	Curva Ariston slope 1 + offset 10° Zone_i min temp = 35° Zone_i max temp = 82°

Tabella 5.5: Simulazioni Ariston

Per quanto concerne i modelli degli edifici, questi sono stati specificati nella tabella degli use cases e fanno riferimento alle configurazioni illustrate in 5.2, nello specifico le classi 1 (anni 70/80), 2 (anni 2000') e 4 (dopo il 2010). Il nome delle simulazioni suggeriscono la tipologia di impianto adottato nell'edificio: impianto a pavimento per LT e radiatori per HT. Nella tabella sono stati specificati alcuni parametri iniziali impostati per la simulazione, come la temperatura esterna data in input al modello, il periodo di costruzione dell'edificio, il tipo di emettitore, la curva di termoregolazione utilizzata (Ariston o Siemens) e il valore di BCT (nullo nel caso Ariston, in quanto non viene tenuto conto dell'inerzia dell'edificio).

Per quanto riguarda invece il comportamento nominale dell'impianto, sono state lanciate delle simulazioni stazionarie (mantenendo la temperatura esterna costante ad un valore arbitrario) per trovare il punto di lavoro che garantisca una temperatura

della zona di 20 °C. E' stato scelto questo valore in quanto rappresenta la temperatura di comfort termico, oltre che per uniformare le condizioni di temperatura della zona in tutte le simulazioni. Di conseguenza, per ogni classe di edificio e la tipologia di emettitore, per trovare il punto di lavoro ideale dell'impianto che garantisse 20° di temperatura ambiente, sono state individuate la curva di termoregolazione con il relativo slope che soddisfacevano questa condizione.

I valori di temperatura esterna scelti per le simulazioni stazionarie sono stati +5° e -5°. Il funzionamento nominale dell'impianto è stato riportato nella tabella rispettivamente per le simulazioni Sim1 LT, Sim2 LT, Sim1 HT e Sim2 HT. Quest'ultimo è stato identificato verificando dai segnali di output della simulazione che la temperatura ambiente valesse 20 °C. Inoltre sono stati riportati alcuni parametri funzionali dell'impianto, come la temperatura di mandata e di ritorno dall'impianto e la portata del fluido in litri/ora.

La procedura per determinare il punto di lavoro prevede di dare come input al blocco simulink dell'FMU dell'edificio non la temperatura di mandata calcolata con la termoregolazione, ma un CH_target arbitrario, procedendo per tentativi. Una volta individuata la mandata, è stato necessario selezionare dai grafici 3.5 e 3.6 le curve di termoregolazione (indicate per le simulazioni Sim3 LT, Sim3 HT, Sim8 LT e Sim8 HT) che in +5°/-5° garantivano il CH_target precedentemente calcolato, aggiungendo all'occorrenza un offset costante alla curva (negativo o positivo) per avere maggiore precisione. In questo modo, si hanno le informazioni per effettuare il set dei parametri per ogni simulazione.

La procedura appena illustrata è stata ripetuta al variare dell'edificio e del tipo di emettitori, dal momento che impianto a pavimento e radiatore hanno punti di lavoro molto diversi.

Per le simulazioni Siemens, illustrate in tabella 5.6, valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza. In questo caso, i valori di BCT sono diversi da zero in quanto viene tenuto conto dell'inerzia dell'edificio (di conseguenza la regolazione di temperatura viene effettuata sulla temperatura esterna composita).

Risulta rilevante fare alcune considerazioni sui valori di BCT scelti per le simulazioni, che vanno da 1 a 20 h. Da un'approfondita analisi di letteratura, che considera gli standard moderni di progettazione e le aspettative di sicurezza e comfort, costanti di tempo dell'edificio oltre le 20h risultano prettamente irrealistiche, individuabili solo in casi ristretti di pareti con una massa molto elevata, come edifici storici e monumentali costruiti con materiali massicci come pietra, marmo o mattoni spessi. In questi casi si potrebbero trovare edifici con costanti di tempo superiori, che però esulano dal contesto applicativo di questo caso di studio, rivolto pressocchè

5.5 Inerzia termica di strutture verticali opache

a sistemi di climatizzazione e riscaldamento di edifici per lo più residenziali.

Simulazioni curve Siemens				
Nome simulazione	Sim4 LT	Sim5 LT	Sim6 LT	Sim7 LT
Toutdoor	-5 °C costante	+5 °C costante	+10° -10° su 24h	+10° -10° su 24h
Tipo di edificio	anni 2000'	anni 2000'	anni 2000'	>2010
Tipo di emettitori	pavimento	pavimento	pavimento	pavimento
Building time constant	0	0	1-5-10-20	1-5-10-20
Tipo di curva	Curva Siemens	Curva Siemens	Curva Siemens	Curva Siemens
Comportamento nominale impianto	Curva Siemens slope 0.5 + offset 2.6° T° mandata = 34.6° T° ritorno = 29.5° Room temp = 20.25° Portata = 1296 l/h	Curva Siemens slope 0.5 + offset 2.6° T° mandata = 30.5° T° ritorno = 25.4° Room temp = 19.7° Portata = 864 l/h	Curva Siemens slope 0.5 + offset 2.6°	Curva Siemens slope 0.25 + offset 6°
Nome simulazione	Sim4 HT	Sim5 HT	Sim6 HT	Sim7 HT
Toutdoor	-5 °C costante	+5 °C costante	+10° -10° su 24h	+10° -10° su 24h
Tipo di edificio	anni 2000'	anni 2000'	anni 70'/80'	anni 2000'
Tipo di emettitori	termosifoni	termosifoni	termosifoni	termosifoni
Building time constant	0	0	1-5-10-20	1-5-10-20
Tipo di curva	Curva Siemens	Curva Siemens	Curva Siemens	Curva Siemens
Comportamento nominale impianto	Curva Siemens slope 1.5 + offset 14° T° mandata = 69.80° T° ritorno = 59.8° Room temp = 20° Portata = 540 l/h	Curva Siemens slope 1.5 + offset 14° T° mandata = 57.8° T° ritorno = 47.8° Room temp = 19.72° Portata = 360 l/h	Curva Siemens slope 1.5 + offset 14°	Curva Siemens slope 1.5 + offset 14°

Tabella 5.6: Simulazioni Siemens

Per il lancio della simulazioni non stazionarie, è stata scelta una durata di 10 giorni, impostando il tempo in secondi $time_sec = 86400 \times 10$ (che in ambiente simulink viene completata solitamente entro qualche minuto), un campionamento della temperatura esterna di 30 secondi, il parametro $curves_logic$ su 1 o 0 a seconda della logica di termoregolazione desiderata, mentre tutti gli altri parametri di configurazione sono definiti nelle tabelle degli use cases. La temperatura esterna è stata generata come una sinusoide con ampiezza 10 e frequenza di $\frac{2\pi}{86400} [\frac{rad}{sec}]$. Infine, i parametri $Zone_i_Min_Temp$ (che entra nella formula di termoregolazione outdoor Ariston) e $Zone_i_Min_Temp$ sono stati tarati in base al tipo di emettitore dell'edificio (le cui caratteristiche specifiche non sono state motivo di approfondimento in quanto presenti nei modelli standard Dymola aziendali). Si può notare come nel caso dei radiatori la temperatura minima è maggiore dal momento che questa tipologia di emettitore necessita di maggior calore per scaldare l'ambiente, a differenza del riscaldamento a pavimento radiante.

5.5 Inerzia termica di strutture verticali opache

L'inerzia termica è la capacità di un materiale di accumulare calore e cederlo in un tempo successivo. Nel caso specifico degli edifici, l'inerzia termica è la capacità di un componente edilizio (parete o tetto) di attenuare le oscillazioni della temperatura ambiente dovuta ai carichi termici interni ed esterni variabili nell'arco del giorno (radiazione solare, persone, elettrodomestici) e di accumulare il calore e rilasciarlo dopo un certo numero di ore nel tempo. La variabilità nel tempo dei carichi termici è determinata dalle seguenti fluttuazioni:

- Variazioni della temperatura esterna nel corso della giornata;

- Variazione della temperatura interna (ad esempio in seguito all'apertura degli infissi);
- Apporti termici interni (cottura, elettrodomestici);
- Temperatura di regime interna;
- Irraggiamento solare (variazione giorno/notte, posizione del sole, nuvolosità);

Un'elevata inerzia termica significa che l'ambiente interno rimane prossimo alla condizione di stato stazionario, al contrario, con un'inerzia bassa, la temperatura interna sarà altamente variabile a seconda degli scambi di calore.

Questa caratteristica dipende per lo più dai materiali che costituiscono l'involucro di una struttura e dalla loro successione stratigrafica, ed è misurabile attraverso due grandezze che descrivono l'onda termica: lo sfasamento e l'attenuazione (o fattore di decremento).

Lo sfasamento termico si definisce come la differenza di tempo fra l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie esterna della struttura, e l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie interna della stessa. In altre parole il tempo che il picco massimo della temperatura esterna impiega ad attraversare completamente un componente edilizio. Attraverso questo indice si riesce ad esprimere il potenziale di una struttura di ritardare la trasmissione del calore) dell'onda termica proveniente dall'esterno.

L'attenuazione invece quantifica la riduzione di ampiezza dell'onda termica nel passaggio attraverso la struttura in esame ed è legata alla conducibilità della stessa (numero adimensionale inferiore a 1 dato dal rapporto tra il massimo flusso della parete in esame e il massimo flusso di una parete a massa termica nulla). Minore è il valore del fattore di attenuazione e maggiore è la riduzione del flusso termico entrante.

La trasmittanza termica (U) rappresenta la quantità di calore che attraversa una struttura di un edificio (ad esempio una parete esterna) a causa della differenza di temperatura esistente tra i due estremi (interno ed esterno) di tale struttura. In sostanza, è la misurazione dell'efficienza con cui un materiale resiste al passaggio di calore e permette di rispondere principalmente a due domande: quanto calore trattiene un edificio e quanto ne disperde. L'unità di misura adottata è il W/m^2K . Volendo dare una definizione più specifica, la trasmittanza è il flusso di calore che attraversa in regime stazionario 1 m^2 di struttura per effetto della differenza di temperatura pari a 1 °C, e viene calcolata come:

$$U = 1/R_t$$

In cui:

- R_t è la resistenza termica totale ($R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$);
- R_{si} è la resistenza termica superficiale interna;
- R_{se} è la resistenza superficiale esterna;
- $R_1 \dots R_n$ sono le resistenze superficiali dei vari strati della parete opaca.

La resistenza termica interna è un valore caratteristico relativo allo scambio termico dall'aria della stanza alla superficie interna dell'elemento edilizio, mentre quella esterna (R_{se}) è il valore caratteristico relativo allo scambio termico dalla superficie esterna dell'elemento edilizio all'aria esterna.

Introdotti questi concetti di base sull'inerzia termica delle strutture verticali opache, si lascia ora spazio ad un esempio per evidenziare l'importanza e i vantaggi apportati da una buona inerzia termica di un edificio.

L'inerzia termica, fisicamente definita dal valore di capacità termica (direttamente proporzionale a calore specifico e densità dei materiali) è comunemente associata alle strutture "pesanti", dette anche "massive". In questi casi, il maggior tempo di risposta nel trasferimento di calore di un edificio con elevata inerzia termica (massivo) in confronto a quello di una struttura leggera (scarsa inerzia termica), si traduce in:

1. Una diminuzione delle oscillazioni di temperatura interna rispetto a quella esterna, ovvero genera livelli più elevati di comfort durante tutte le 24 ore mantenendo più stabili temperatura e umidità relative interne.
2. La diminuzione del flusso di calore che attraversa le pareti quindi minor raffreddamento nella stagione invernale e minor surriscaldamento in quella estiva, con conseguente riduzione del consumo di energia per il riscaldamento/raffreddamento.

In prima approssimazione, considerando una variazione periodica regolare con 24 ore di ciclo delle principali condizioni al contorno (ad esempio la temperatura dell'aria esterna, l'umidità relativa ed i valori di radiazione solare), il flusso di trasferimento di calore può essere visualizzato come nel grafico riportato a lato, nel quale:

- La linea verde rappresenta il flusso di calore attraverso una parete in mattoni (massiva);
- La linea rossa rappresenta il flusso di calore attraverso una parete ipotetica, con lo stesso valore di trasmittanza (U) dell'altro, ma senza alcuna capacità termica, ossia a peso nullo.

La capacità di accumulare calore (capacità termica) della parete reale in muratura (linea verde) influisce sulle temperature interne superficiali della stessa in due modi:

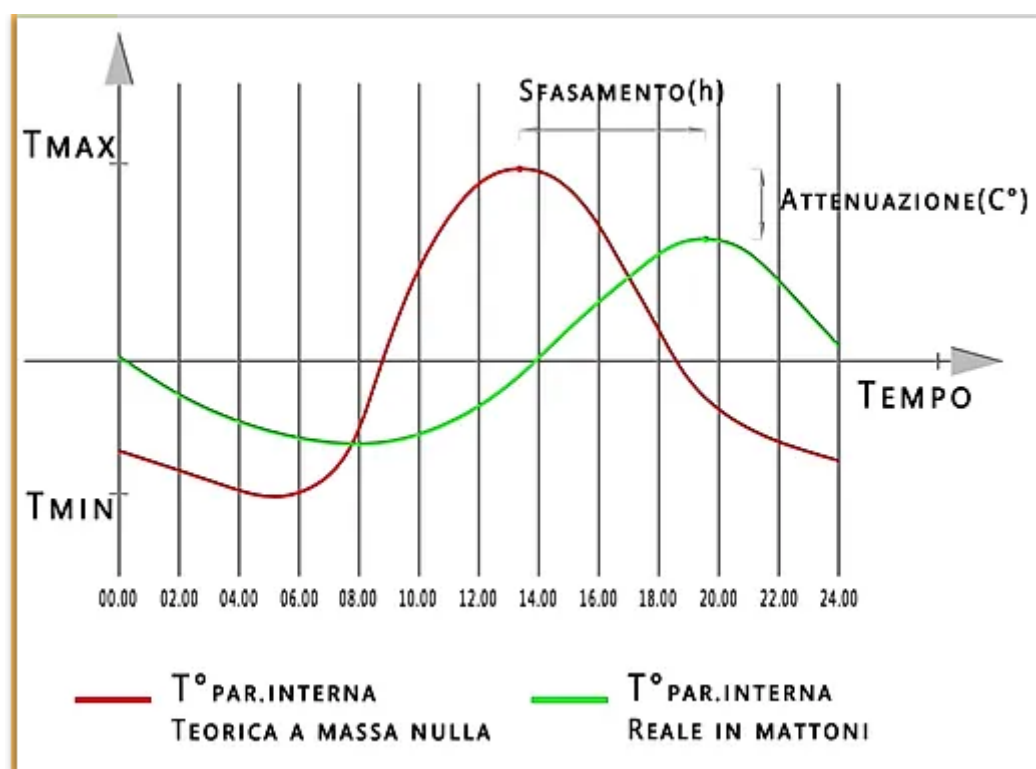


Figura 5.12: Inerzia termica di una parete [25]

- Producendo un ritardo di alcune ore nell'arrivo del picco di temperatura all'interno;
- Riducendo la temperatura massima che si manifesterà all'interno;

Grazie alla capacità termica della muratura, solo una parte del calore assorbito dalla muratura viene ceduto all'interno dell'edificio, mentre una parte, la cui quantità dipende dalle caratteristiche dei materiali di cui la parete è composta, rimane all'interno della parete e viene dissipato nuovamente verso l'esterno quando le condizioni lo permettono. Se invece le stesse pareti fossero considerate con condizioni al contorno costanti (valutazione in regime stazionario) i due flussi termici risulterebbero avere schematizzazioni identiche, in quanto, come detto in precedenza, questo metodo di calcolo non considera l'accumulo termico nelle pareti.

È un dato di fatto che quest'ultimo approccio (calcolo in regime stazionario) è riduttivo, anche se, ad oggi, è quello principalmente diffuso nelle comuni pratiche di progettazione.

In conclusione, i benefici derivanti da una buona inerzia termica sono evidenti:

- L'attenuazione suggerisce la possibilità di ridurre il dimensionamento dell'impianto di climatizzazione estiva dell'edificio;

5.6 Simulazioni esplorative con influenza dello sfasamento termico

- Lo sfasamento indica la collocazione temporale (cioè in quali condizioni termiche ambientali si farà sentire) dell'apparire all'interno dell'abitazione delle condizioni peggiori del clima naturale esterno (minima temperatura notturna d'inverno e massimo irraggiamento d'estate).

L'attuale norma in materia di efficienza energetica è il DM 26/06/15 detto "Decreto requisiti minimi" [17], il quale all'App. A dell'All. 1 indica i valori limite della trasmittanza termica U in funzione della zona climatica, al di sotto della quale devono sottostare i vari componenti edilizi che compongono l'edificio rispetto ad un edificio campione, che prende il nome di edificio di riferimento. Nella tabella sottostante si riportano i valori di trasmittanza termica relativamente alle strutture opache verticali (pareti) indicate nel decreto.

TAB. 1 (Appendice A)		
Zona climatica	U_{rif} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 5.7: Trasmittanza termica U di riferimento delle strutture opache verticali

5.6 Simulazioni esplorative con influenza dello sfasamento termico

Le ultime simulazioni di questo studio rappresentano un primo tentativo di investigare l'effetto dello sfasamento termico sulla termoregolazione. A tal fine, le stratigrafie degli edifici illustrati in 5.2 sono state modificate in Termus-G riducendo o aumentando lo spessore del mattone, aumentando o diminuendo di conseguenza lo sfasamento termico.

Gli use-cases delle simulazioni seguono il filo logico di quelle precedenti e sono consultabili nelle tabelle 5.8 e 5.9. In questo caso sono stati riportati anche lo spessore in cm dello strato di mattone della parete e lo sfasamento termico complessivo (dopo la modifica). I valori di sfasamento sono stati scelti in modo da cercare un'eventuale correlazione con la costante di tempo dell'edificio. In particolare, la domanda a cui si è cercato di rispondere è se in edifici con un certo valore di sfasamento termico la termoregolazione fosse più efficiente con un valore simile di BCT.

Le condizioni iniziali del sistema sono quindi riassunte di seguito:

- Zona termica singola con dimensioni 175 m^2 ;

Capitolo 5 Simulazioni di termoregolazione Outdoor

Simulazioni curve Ariston				
Nome simulazione	Sim1		Sim2	
Toutdoor	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h
Tipo di edificio	anni 70'/80'	anni 70'/80'	anni > 2010	anni > 2010
Sfasamento	5h	10h	15h	22h
Spessore parete	12 cm	28 cm	25 cm	42 cm
Tipo di emettitori	radiatori	radiatori	pavimento	pavimento
Generatore	caldaia	caldaia	pompa di calore	pompa di calore
Building time constant	/	/	/	/
Tipo di curva	Curva Ariston	Curva Ariston	Curva Ariston	Curva Ariston
Condizioni di lavoro a +5°/-5°	-5° -> 72° mandata +5° -> 58° mandata	-5° -> 65° mandata +5° -> 53° mandata	-5° -> 32.5° mandata +5° -> 29° mandata	-5° -> 32° mandata +5° -> 29° mandata
Configurazione curve	Zone_i max temp = 82° Zone_i min temp = 40° Slope 1.4 + Offset 7°	Zone_i max temp = 82° Zone_i min temp = 40° Slope 1.2 + Offset -5°	Zone_i max temp = 45° Zone_i min temp = 20° Slope 0.4 + offset 3°	Zone_i max temp = 45° Zone_i min temp = 20° Slope 0.4 + offset 3°

Tabella 5.8: Simulazioni sfasamento Ariston

- Zona termica senza contributi di occupation e irraggiamento;
- Room Setpoint = 20° (no programmazione oraria);

Le differenze invece sono le seguenti:

- L'impianto di riscaldamento degli edifici non è costituito da un generatore di calore ideale ma da una caldaia a condensazione (per l'edificio più vecchio) e una pompa di calore (per l'edificio recente);
- La temperatura esterna viene fornita in input al sistema sia come sinusoide che come onda quadra;

Sono stati considerati solo le classi di edifici che presentano il divario costruttivo più evidente, ovvero il classe 1 (anni 70'/80') e il classe 4 (anni dopo il 2010).

Per individuare le condizioni di lavoro che garantissero una temperatura ambiente di 20° sono state effettuate le medesime simulazioni stazionarie descritte in precedenza. Le caratteristiche della zona termica rimangono invariate.

Simulazioni curve Siemens				
Nome simulazione	Sim3		Sim4	
Toutdoor	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h	Sinusoide +10°/-10° in 24h Onda quadra +10°/-10° in 24h
Tipo di edificio	anni 70'/80'	anni 70'/80'	anni > 2010	anni > 2010
Sfasamento	5h	10h	15h	22h
Spessore parete	12 cm	28 cm	25 cm	42 cm
Tipo di emettitori	radiatori	radiatori	pavimento	pavimento
Generatore	caldaia	caldaia	pompa di calore	pompa di calore
Building time constant	5-10-15-20	5-10-15-20	5-10-15-20	5-10-15-20-25
Tipo di curva	Curva Siemens	Curva Siemens	Curva Siemens	Curva Siemens
Condizioni di lavoro a +5°/-5°	-5° -> 72° mandata +5° -> 58° mandata	-5° -> 65° mandata +5° -> 53° mandata	-5° -> 32.5° mandata +5° -> 29° mandata	-5° -> 32° mandata +5° -> 29° mandata
Configurazione curve	Slope 1.75 + Offset 10°	Slope 1.75 + Offset 5°	Slope 0.5 + offset 1°	Slope 0.5 + offset 1°

Tabella 5.9: Simulazioni sfasamento Siemens

Capitolo 6

Analisi dei risultati delle simulazioni

In questo capitolo conclusivo vengono esposte le considerazioni finali ed osservazioni emerse dalle simulazioni di termoregolazione outdoor con logiche Ariston e Siemens. I risultati sono stati studiati mediante rappresentazioni grafiche dei dati di output delle simulazioni, opportunamente convertiti in MatLAB (tramite l'ausilio di uno script python) in un formato interpretabile dal software Dymola. Sono stati monitorati i parametri più significativi che influiscono sull'efficienza energetica dell'impianto e il comfort termico degli occupanti. Inoltre, successivamente allo studio dei grafici, le prestazioni delle simulazioni verranno approfondite mediante un'analisi numerica in MatLAB di alcuni parametri caratteristici dell'impianto di riscaldamento.

6.1 Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens

Sono state confrontate le simulazioni Ariston/Siemens con configurazioni edificio/e-mettitore analoghe, così da mettere in evidenza eventuali vantaggi e svantaggi delle due logiche. Per maggiore chiarezza vengono illustrati gli use-cases messi a paragone nella tabella 6.1.

Simulazioni comparate			
Tipologia edificio	Classe edificio	Ariston	Siemens
Anni 70/80 con radiatori	1	Sim8 HT	Sim6 HT
Anni 2000' con impianto a pavimento	3	Sim3 LT	Sim6 LT
Anni 2000' con radiatori	3	Sim3 HT	Sim7 HT
Anni > 2010 con impianto a pavimento	4	Sim8 LT	Sim7 LT

Tabella 6.1: Confronto simulazioni

6.1.1 Simulazioni edificio classe 1

In questa sezione verranno messe a confronto le simulazioni sull'edificio classe 1 (anni 70'/80' con impianto a radiatori). I parametri su cui è stata posta maggiore attenzione sono i seguenti:

- CH_target (valore di riferimento per la mandata);

- Temperatura ambiente della zona termica;
- Andamento della $T_{composite}$;
- Cicli on/off del generatore: è stata osservata la frequenza degli spegnimenti del generatore;
- Tempo di accensione del generatore;
- Temperatura media della mandata all'impianto (LWT: Leaving Water Temperature);
- Portata del fluido dell'impianto (in kg/s);

Nella figura 6.1 vengono sovrapposti i CH_target nel caso Ariston e nel caso Siemens con una costante di tempo pari ad 1, simulando quindi un'inerzia dell'edificio molto bassa. Sull'asse delle ascisse viene riportato il tempo in ore, mentre sull'ordinata la temperatura, in questo caso in gradi Celsius. Al fine di valutare il comportamento dell'impianto a regime permanente, è stato considerato l'intervallo di dati relativo agli ultimi giorni di simulazione, dall'ora 175 in poi (si ricorda che la durata totale delle simulazioni è di 10 giorni, ovvero 240 ore).

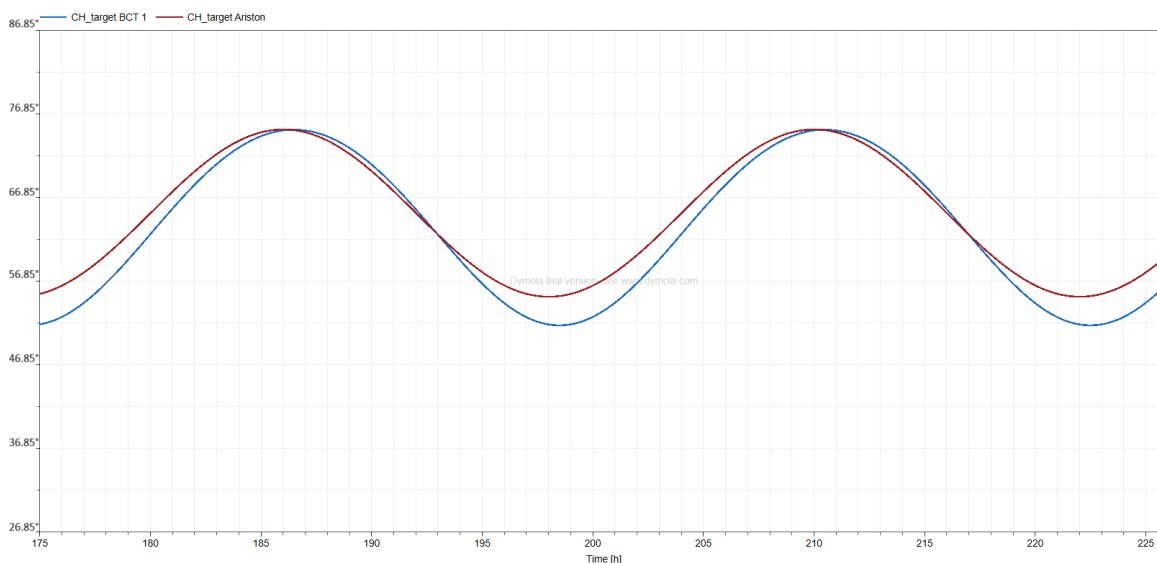


Figura 6.1: CH_target Ariston/Siemens con BCT=1

Questo primo grafico è motivo di un'importante osservazione: la differenza tra i due CH_target risulta minima. In altre parole, la temperatura di mandata calcolata con la termoregolazione differisce di poco per due ragioni:

1. Rispetto alle curve lineari Ariston, quelle Siemens introducono una non linearità lieve, che quindi non comporta delle differenze rilevanti in fase di regolazione della temperatura di mandata.

6.1 Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens

2. L'influenza del BCT risulta minima in quanto è stato preso in considerazione il valore minimo di 1h.

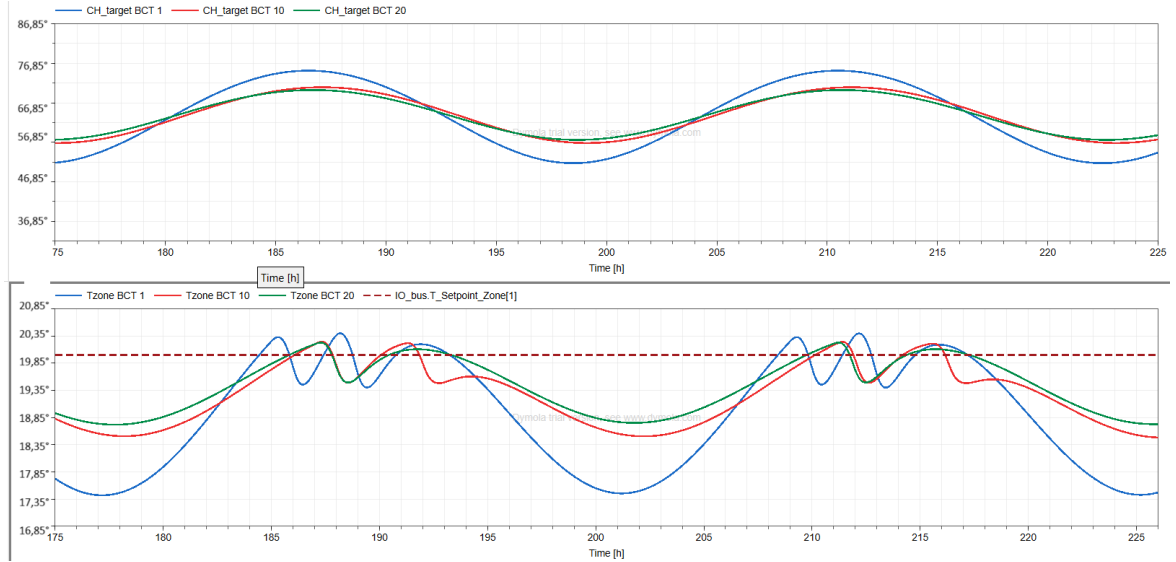


Figura 6.2: CH_target BCT 1-10-20

Nel grafico 6.2 sono rappresentati i CH_target e la temperatura della zona solo nel caso Siemens, con costanti di tempo 1,10,20. Da questo confronto è già possibile ipotizzare in modo qualitativo quale delle configurazioni garantisce un miglior risultato in termini di comfort termico (l'obiettivo è mantenere il più costante possibile la temperatura della stanza sui 20°). In primo luogo, nella parte superiore, è evidente come BCT maggiori comportino un'attenuazione più evidente sul CH_target, da giustificare con un'azione filtrante maggiore. Di conseguenza, a temperature di mandata più smorzate (e quindi minori) corrisponde una temperatura della zona con andamento più lineare, con molte meno oscillazioni. Infatti, osservando le T_{zone} con BCT 1 e 20, non si può non notare una notevole differenza di prestazione. Nel secondo caso, l'azione filtrante sul CH_target migliora il mantenimento della temperatura ambiente. La linea tratteggiata rappresenta la temperatura di setpoint (20°).

Rimanendo sulla parte inferiore, è opportuno mettere in evidenza la motivazione delle oscillazioni più pronunciate, soprattutto nel caso T_{zone} BCT 1: in fase di termoregolazione vi è un fenomeno di isteresi tale per cui quando la T_{zone} supera il valore di setpoint di 0.2° il generatore viene spento (questa pratica viene adottata nel caso Ariston ma è comunemente diffusa nei meccanismi di termoregolazione presenti sul mercato). Questo spiega i picchi ben visibili soprattutto nel caso di T_{zone} con BCT = 1. A fronte di un improvviso spegnimento della richiesta di calore, la temperatura della stanza si abbassa repentinamente.

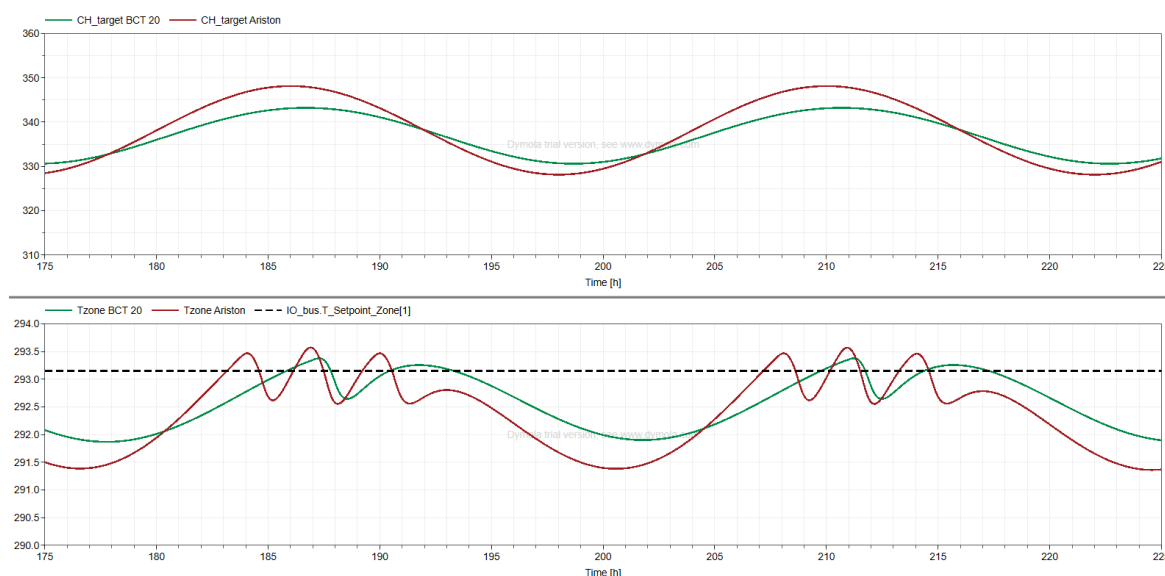


Figura 6.3: CH_target Ariston/Siemens con BCT=20

Successivamente sono stati messi a confronto il CH_target Ariston con quello Siemens nel caso di $BCT = 20$ (che sembra performare meglio) in figura 6.3 (in questo caso la temperatura di mandata sull'asse y è riportata in gradi kelvin). Si nota come nel caso Siemens, il CH_target più attenuato fa sì che si abbia una temperatura ambiente più regolare rispetto al caso Ariston.

Della medesima casistica è stata analizzata anche la percentuale di cicli on/off, ovvero gli spegnimenti del generatore dovuti al fatto che la temperatura ambiente supera quella di setpoint di $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e successive riaccensioni, (figura 6.4) e la portata del fluido termovettore (figura 6.5).

In merito ai cicli on/off si può osservare come nel caso Siemens con $BCT = 20$ ci siano molti meno spegnimenti. Questo in linea generale può comportare alcuni vantaggi:

- Minore usura meccanica: Ogni ciclo di accensione e spegnimento provoca stress meccanico e termico sui componenti del generatore di calore. Ridurre il numero di cicli può diminuire l'usura e prolungare la vita utile del sistema;
- Affidabilità: Con meno cicli di accensione e spegnimento, c'è una minore probabilità di guasti associati a questi cambiamenti di stato;

Tuttavia esistono anche potenziali aspetti negativi:

- Consumo energetico: Un generatore di calore che rimane acceso per periodi prolungati può consumare più energia rispetto a uno che si accende solo quando necessario. Ciò può aumentare i costi operativi, soprattutto se il sistema non è utilizzato in modo efficiente;
- Efficienza operativa: Generatori come pompe di calore o le caldaie hanno una gamma di carico ottimale in cui operano con la massima efficienza. Se un

6.1 Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens

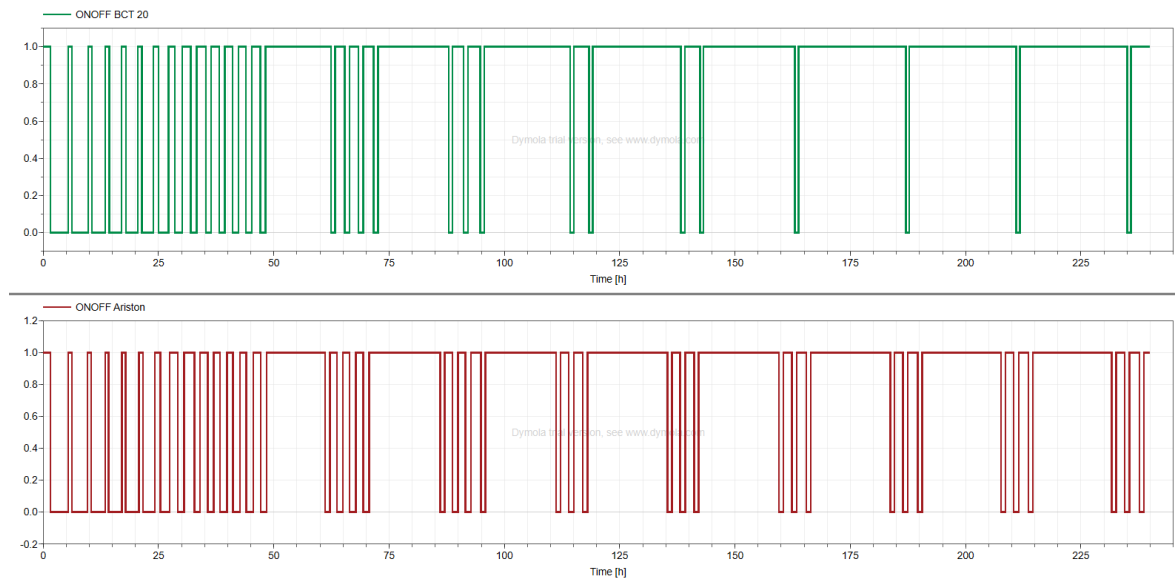


Figura 6.4: Cicli On/Off generatore

generatore di calore rimane acceso a bassa capacità per lunghi periodi, potrebbe funzionare al di fuori della sua gamma ottimale, portando a un aumento del consumo energetico per unità di calore prodotta.

Generatori di calore come caldaie e pompe di calore si differenziano particolarmente per principio termico e range di funzionamento. Le caldaie, in particolare, possono subire stress termico significativo quando si accendono e si spengono frequentemente. Questo può causare espansione e contrazione ripetute dei materiali, aumentando il rischio di crepe o altri danni. Meno cicli possono significare che il sistema mantiene una temperatura più stabile, migliorando il comfort. Tuttavia, questo deve essere bilanciato con l'efficienza energetica complessiva. L'uso di un sistema di controllo intelligente che ottimizza i tempi di accensione e spegnimento del generatore di calore in base alla domanda effettiva può aiutare a trovare un equilibrio tra l'efficienza energetica e la durata del generatore.

Tuttavia, suddette considerazioni rimangono puramente qualitative in quanto per questo caso specifico è stato utilizzato un generatore di calore ideale. Ciononostante gettano le basi per ulteriori approfondimenti volti a sfruttare maggiormente il funzionamento di quest'ultimo a seconda delle applicazioni.

6.1.2 Simulazioni edificio classe 2

Vengono trattati ora i risultati relativi alle simulazioni di termoregolazione effettuate sull'edificio dei primi anni 2000', sia con impianto a pavimento che con radiatori.

Nella figura 6.6 viene raffigurata la temperatura esterna composita distinta da

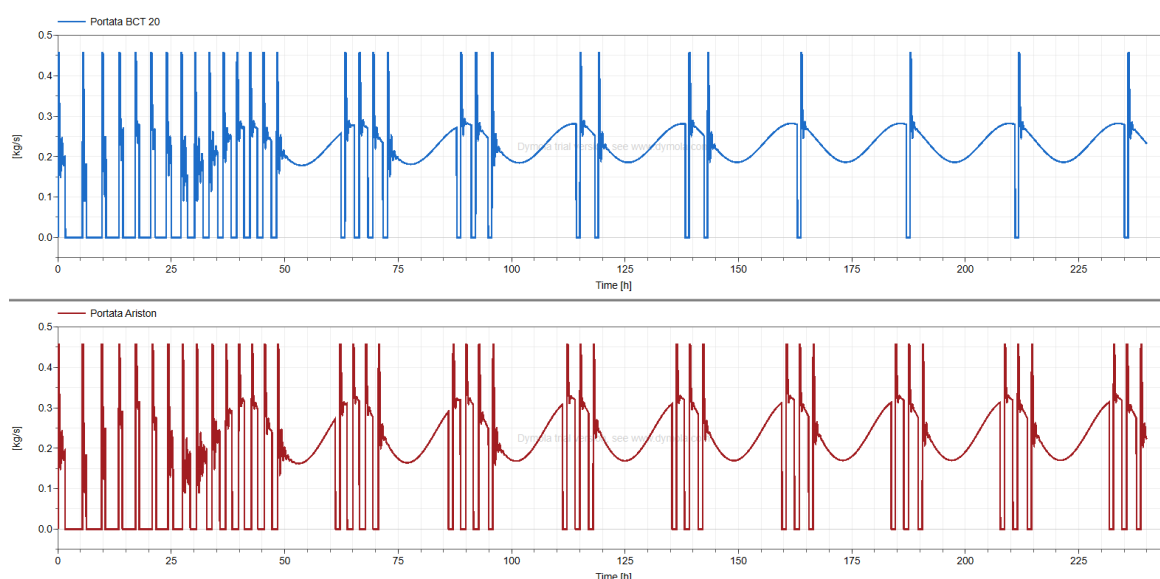


Figura 6.5: Portata fluido termovettore

vari valori di *Building Time Constant* rispetto alla temperatura esterna. Risulta chiaro come all'aumentare del BCT, aumenti anche l'azione smorzante del filtro passa basso. Di conseguenza, la temperatura esterna composita avrà un andamento più smussato, contribuendo ad un incremento o decremento del CH_target più graduale. Questo aspetto è di fondamentale importanza se si pensa ad un'eventuale escursione repentina di temperatura esterna che causerebbe un rapido innalzamento della mandata all'emettitore per compensare e mantenere la temperatura ambiente al livello di setpoint. Tuttavia, un comportamento di questo genere può causare oscillazioni (sovraelongazioni o sottoelongazioni) nell'uscita del regolatore. In queste condizioni, considerare l'inerzia dell'edificio può aiutare a ridurre questi andamenti indesiderati.

6.1 Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens

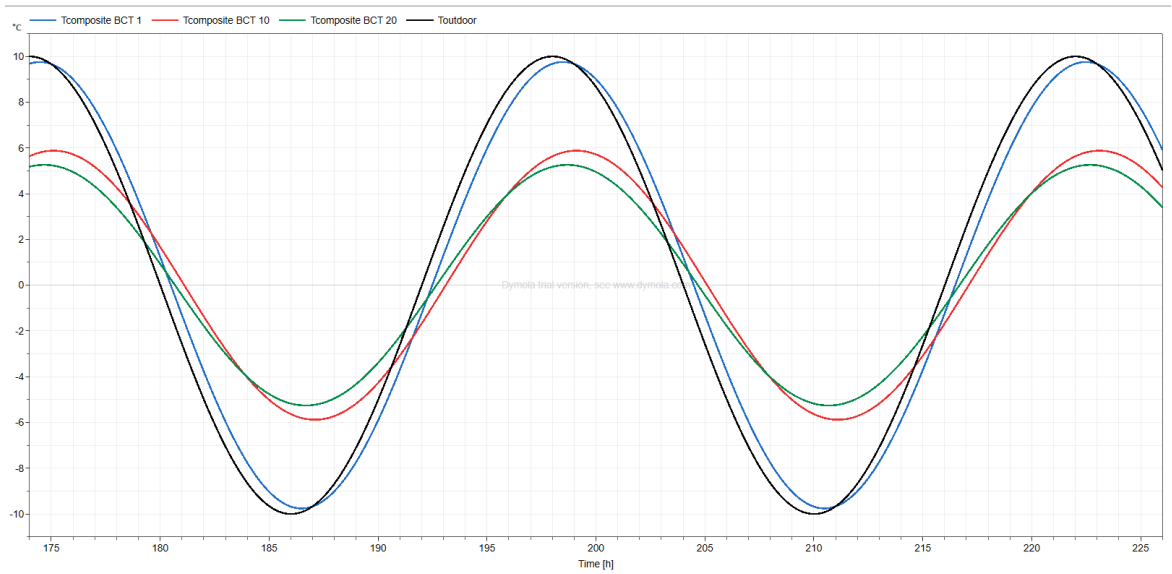


Figura 6.6: Andamento Tcomposite

Come nel caso precedente, sono state analizzate le performance tra i diversi BCT del caso Siemens per individuarne la migliore. Osservando il grafico 6.7, la T_{zone} che segue meglio il riferimento del setpoint di 20° risulta essere quella con BCT = 20.

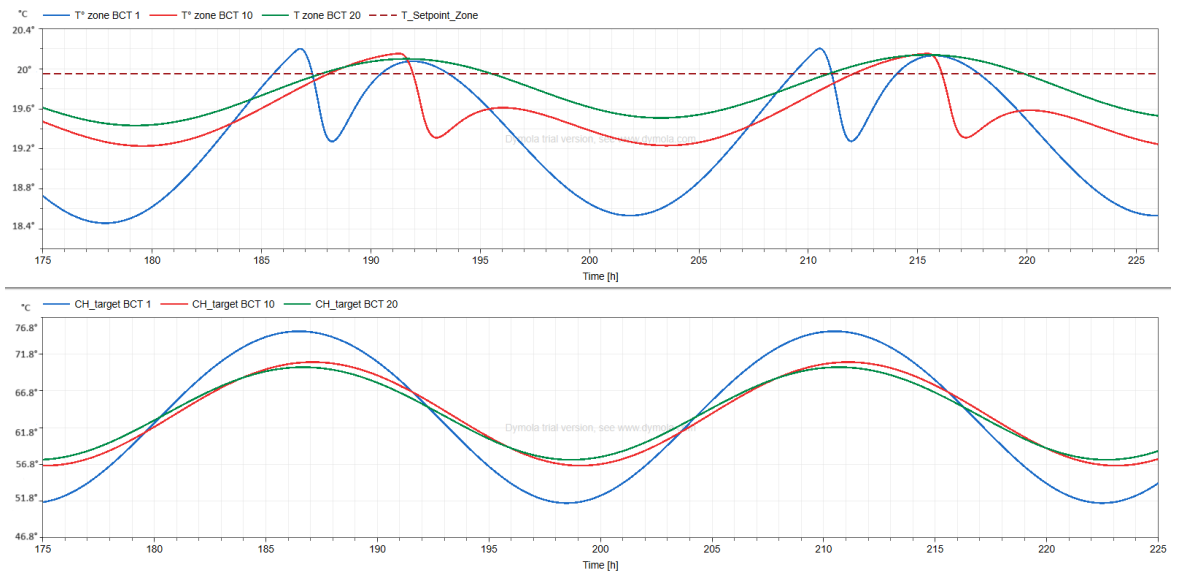


Figura 6.7: Analisi performance caso Siemens

Di conseguenza sono stati osservati i risultati ottenuti nel caso Siemens con BCT = 20 e il caso Ariston (figura 6.8): la T_{zone} risulta essere caratterizzata da notevoli oscillazioni, che la portano a scendere fino ad un minimo di 291 gradi Kelvin (18.4 °C). Il comportamento nel caso Siemens risulta essere più performante oscillando meno e mantenendo più stabile la temperatura della zona.

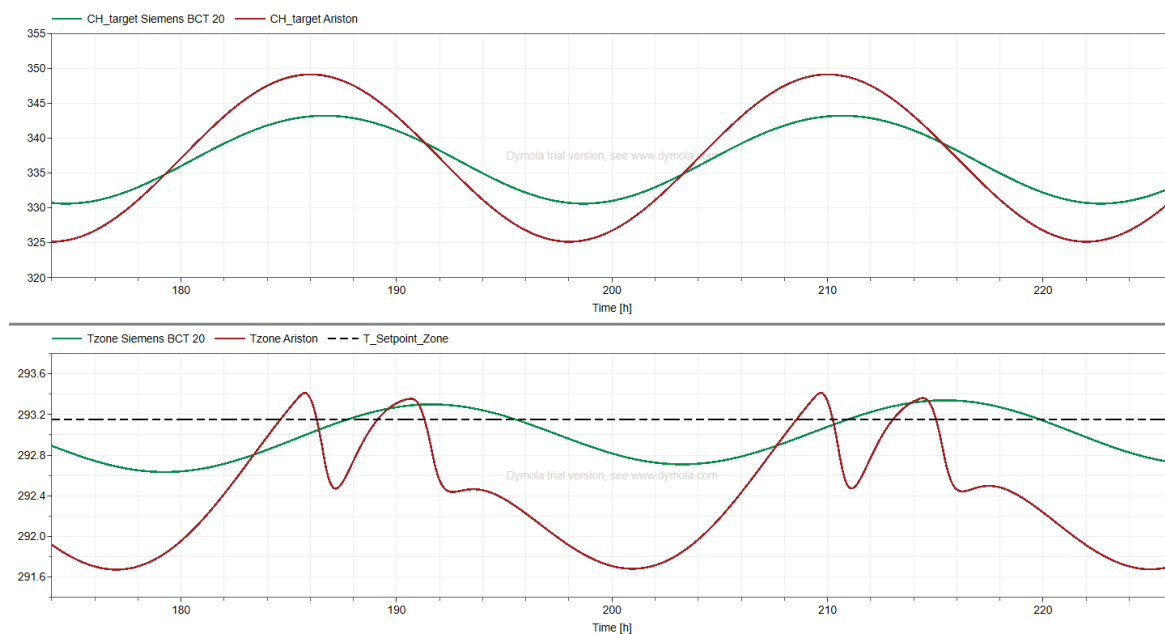


Figura 6.8: Confronto Ariston Siemens con $BCT = 20$

Anche in questo caso sono riportati i grafici della portata e degli spegnimenti del generatore. Si osserva che il numero di spegnimenti differisce notevolmente tra i due casi di studio. Inoltre, gli improvvisi azzeramenti e conseguenti picchi della portata sono dovuti proprio agli spegnimenti (a generatore spento la portata è nulla).

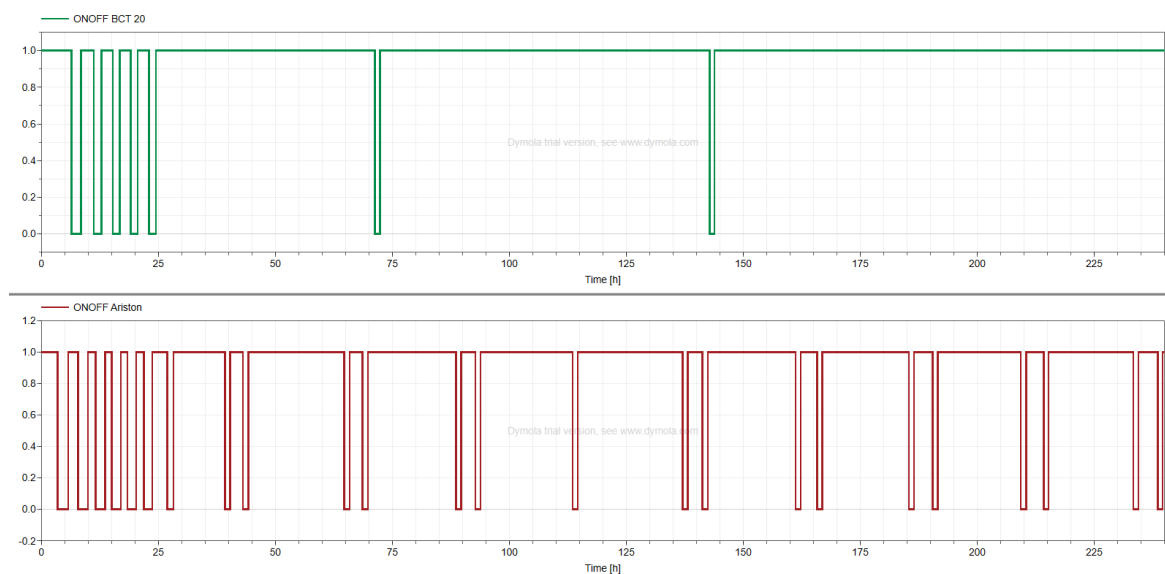


Figura 6.9: Cicli On/Off

6.1 Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens

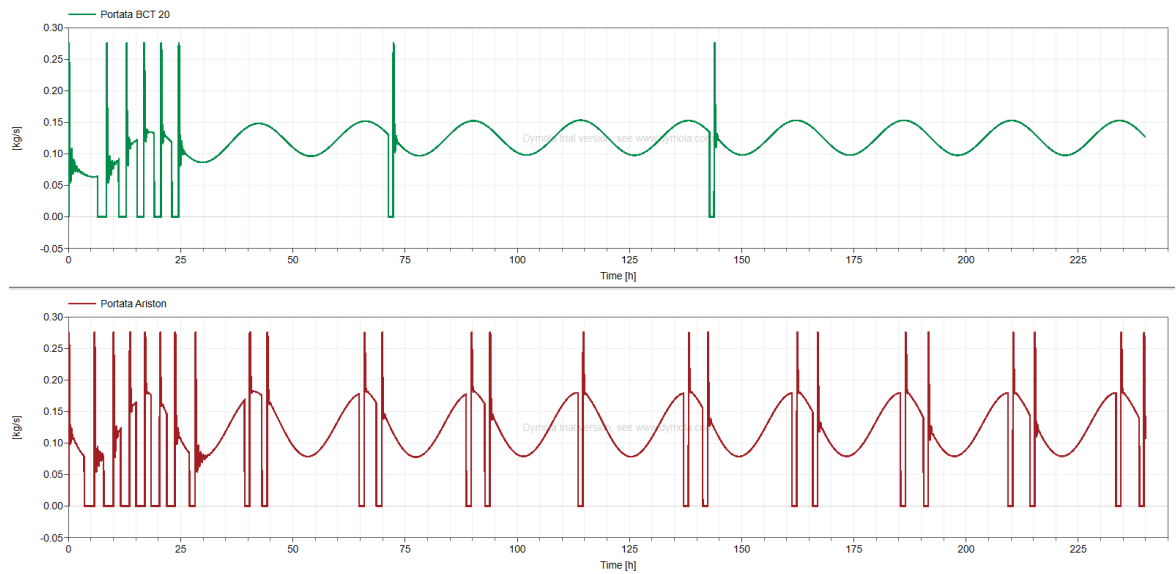


Figura 6.10: Portata del fluido termovettore

Per quanto concerne invece l'edificio classe 3 con impianto a pavimento, è stata condotta la medesima analisi del caso precedente. Sono riportati di seguito i grafici più significativi:

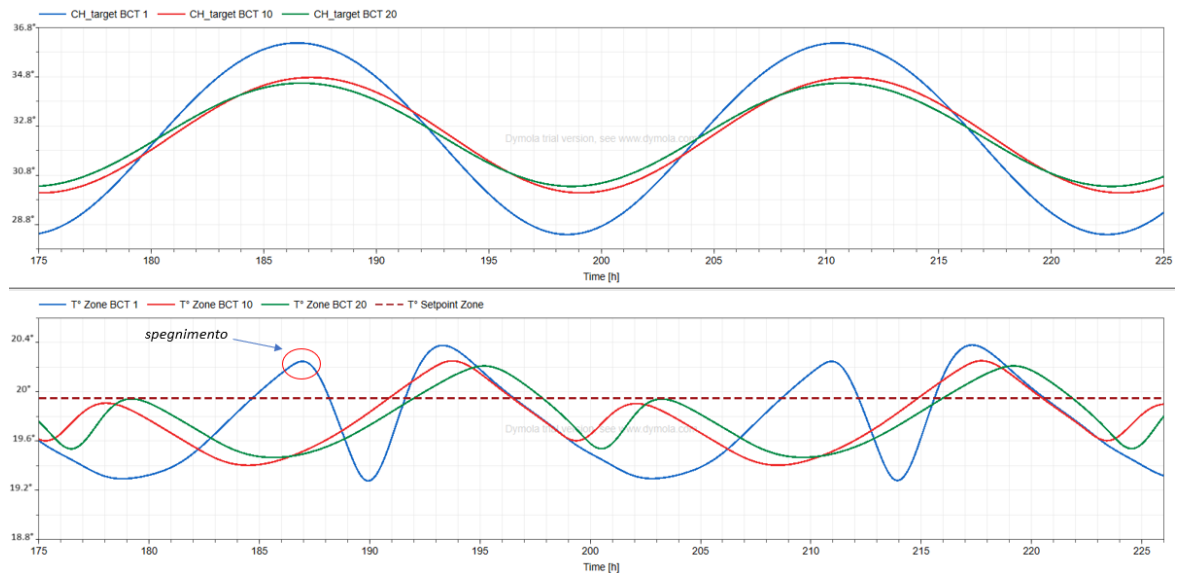


Figura 6.11: Analisi performance caso Siemens

Anche in questo caso, gli spegnimenti nel caso di $BCT = 1$ sono più frequenti, come si evince dalla figura 6.11. Comparando i CH_target tra Siemens con $BCT=20$ e Ariston, si nota che entrambe le configurazioni garantiscono buoni risultati mantenendo la temperatura della zona prossima ai 20° (293.15 gradi Kelvin).

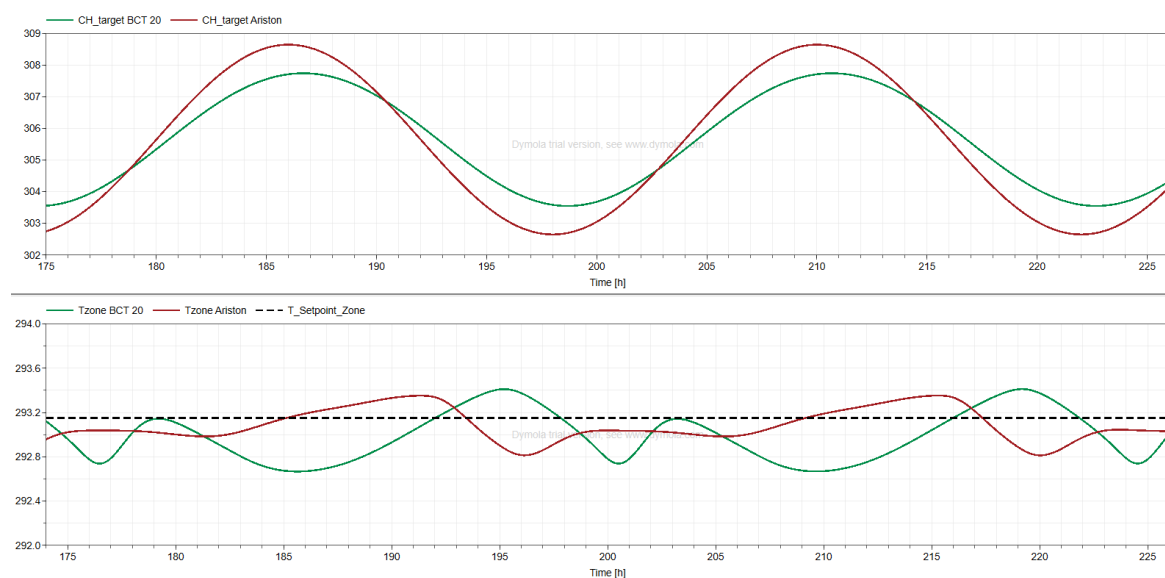


Figura 6.12: CH target e Tzone Ariston/Siemens

I cicli on/off del generatore ideale (figura 6.13) rimangono pressocchè invariati tra le logiche Ariston e Siemens.

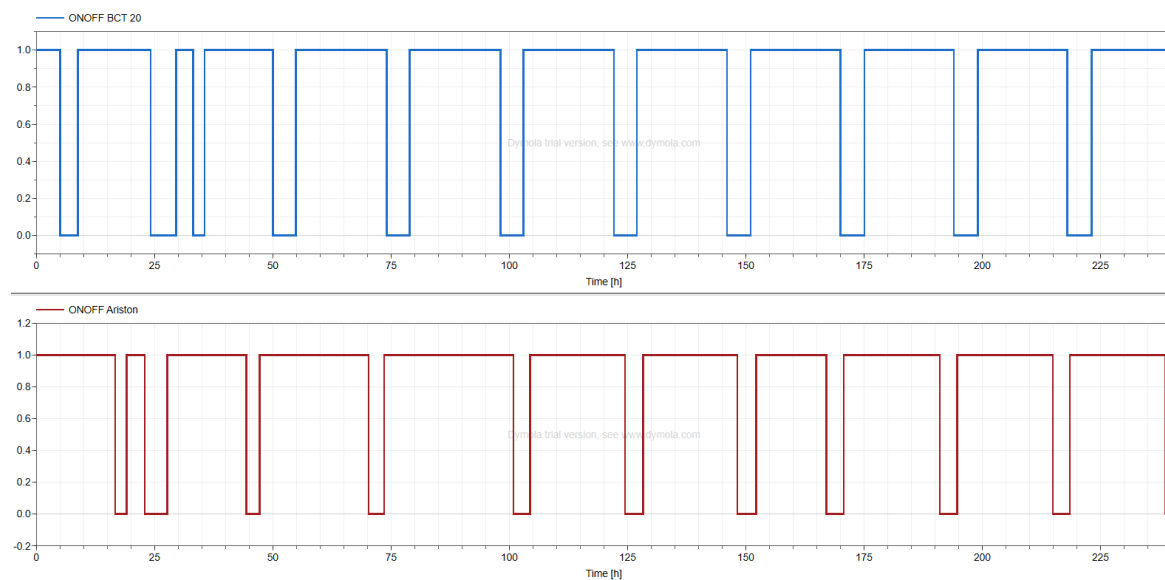


Figura 6.13: Cicli on/off termostato

6.1 Risultati simulazioni comparative Ariston/Siemens

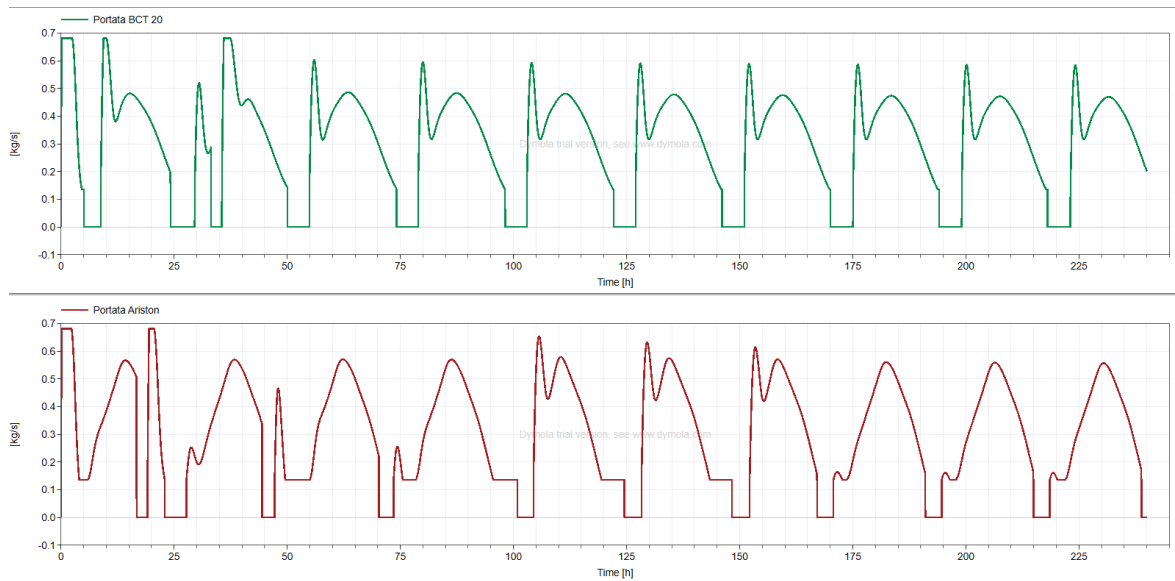


Figura 6.14: Portata del fluido termovettore

6.1.3 Simulazioni edificio classe 4

Infine, analizzando le simulazioni comparative nel caso dell'edificio più moderno, si nota un trend diverso rispetto al filo comune delle casistiche precedenti. Il grafico 6.15 evidenzia un comportamento migliore con un BCT = 1 rispetto a valori maggiori. In questo caso sono stati riportati gli andamenti solo dei BCT 1 e 5, tuttavia per valori maggiori aumentano anche le oscillazioni della temperatura ambiente della zona.

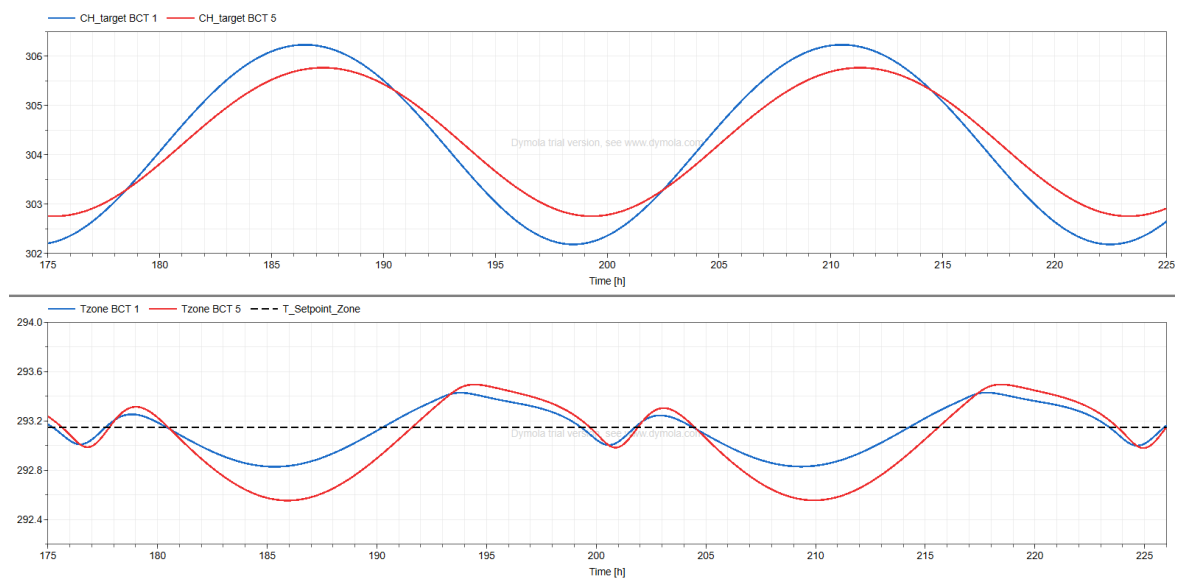


Figura 6.15: CH target BCT 1-5

6.1.4 Analisi numerica dei risultati

Terminate le simulazioni, i risultati sono stati sottoposti ad un'analisi numerica in MatLAB per analizzare il comportamento complessivo dell'impianto di riscaldamento nelle varie casistiche. Lo script utilizzato è visualizzabile in appendice 1.4.

	Simulazioni curve Ariston			
	Sim3 HT (anni 2000' radiatori)	Sim3 LT (anni 2000' pavimento)	Sim8 HT (anni 70'/80' radiatori)	Sim8 LT (anni > 2010 pavimento)
Durata simulazione (giorni)	5	5	5	5
Cicli on/off	10	5	15	10
Tempo accensione generatore (h)	109.19	100.03	105	77.4
Media LWT (°C)	63.14	32.86	63,8	31.68
Media T° room (°C)	19.44	19.93	19,6	19.95

Tabella 6.2: Analisi numerica Ariston

Vengono messi in evidenza i seguenti parametri:

- Durata simulazione: vengono considerati gli ultimi 5 giorni di simulazione;
- Cicli on/off del generatore;
- Tempo totale di accensione del generatore;
- Media LWT: temperatura media della temperatura di mandata;
- Media T_{room} : temperatura media nella zona;

In tutti i casi la temperatura della zona si aggira sui 20°, quindi si può affermare con certezza che il comfort termico viene garantito da entrambe le configurazioni. Inoltre valgono le seguenti osservazioni:

- Il tempo di accensione del generatore differisce a seconda degli emettitori, e risulta essere più prolungato nel caso dei radiatori.
- Il numero di cicli on/off è nettamente minore nel caso Siemens rispetto al caso Ariston, a scapito di un'accensione prolungata da parte del generatore ideale.

	Simulazioni curve Siemens															
	Sim6 LT (anni 2000' pavimento)				Sim7 HT (anni 2000' radiatori)				Sim7 LT (anni >2010 pavimento)				Sim6 HT (anni 70'/80' radiatori)			
	BCT 1	BCT 5	BCT 10	BCT 20	BCT 1	BCT 5	BCT 10	BCT 20	BCT 1	BCT 5	BCT 10	BCT 20	BCT 1	BCT 5	BCT 10	BCT 20
Durata simulazione (giorni)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Cicli on/off	10	5	5	5	6	5	4	1	5	5	10	10	11	10	9	6
Tempo accensione generatore (h)	77.64	98.44	92.68	94.96	113.44	114.64	115.77	118.94	86.21	86.34	80.73	81.32	109.1	110.9	112.4	115.24
Media LWT (°C)	32.65	32.27	32.61	32.87	62.92	62.83	62.66	62	31.61	31.42	31.5	31.47	62,7	63	63,24	63,4
Media T° room (°C)	19.78	19.77	19.74	19.8	19.46	19.58	19.72	19.8	19.93	19.84	19.8	19.8	19.37	19.54	19,6	19,7

Tabella 6.3: Analisi numerica Siemens

Come specificato in precedenza, avere un minor numero di cicli on/off può avere il vantaggio principale di prolungare la vita utile del generatore di calore, tuttavia, un tempo di accensione maggiore può comportare consumi energetici maggiori. In questo caso, adottando un generatore ideale, risulta difficile effettuare un'analisi energetica affidabile in quanto i risultati non fanno riferimento a generatori utilizzati nel mercato odierno, come pompe di calore o caldaie.

6.2 Risultati simulazioni esplorative sull'influenza dello sfasamento termico

L'analisi dei risultati delle simulazioni con l'influenza dello sfasamento termico ha introdotto una complessità rilevante in questo caso di studio, ampliando notevolmente il numero di test necessari per comprenderne a pieno l'effetto. Le simulazioni stazionarie ad una temperatura esterna costante in $+5^{\circ}/-5^{\circ}$ hanno consentito di trovare i punti di lavoro dell'impianto. Questa operazione è stata resa ancor più importante dal momento che in questo caso il generatore di calore non è ideale, questo comporta che il CH_target non viene raggiunto istantaneamente. Per quanto riguarda invece le simulazioni dinamiche sono stati indagati gli effetti della variazione dello sfasamento termico sulla stessa tipologia di edificio.

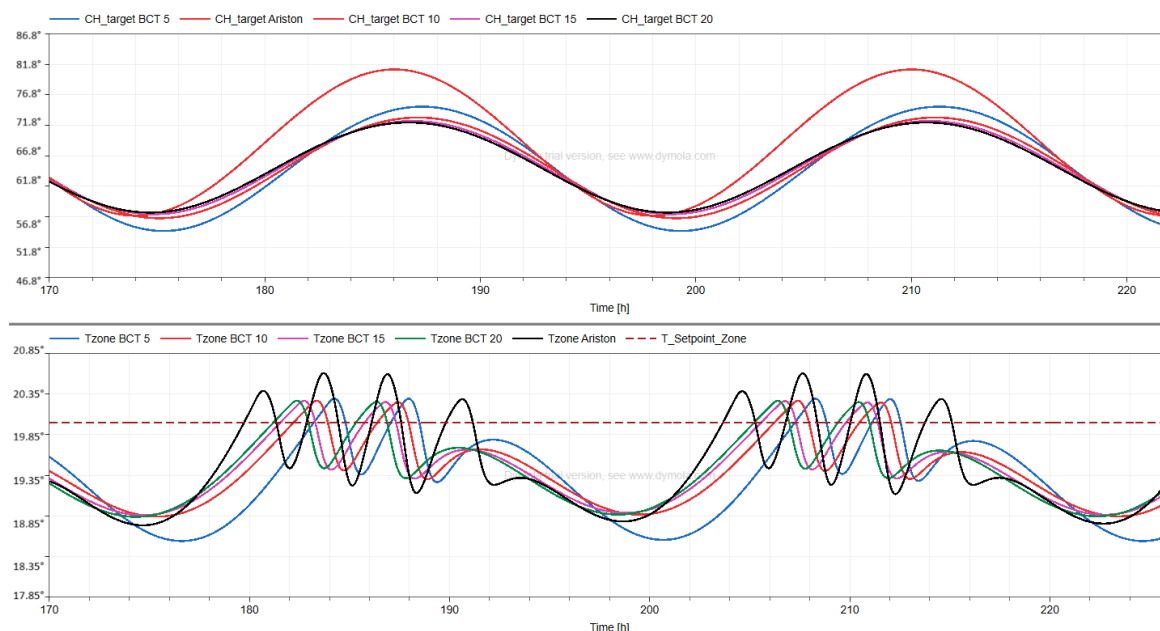


Figura 6.16: Edificio classe 1 con spessore 12 cm

Partendo dall'edificio classe 1 con spessore 12 cm e sfasamento termico 5 h (figura 6.16) vengono rappresentati gli andamenti dell'LWT nel grafico superiore e la temperatura della zona in quello inferiore. L'unità di misura delle ordinate è in gradi Kelvin, di conseguenza per convertirli in gradi Celsius è necessario sottrarre la quantità 273.15. Nel caso Siemens si nota che la temperatura di mandata (LWT) ha andamenti molto simili al variare delle costanti di tempo dell'edificio, cosa che si riflette anche in una similarità delle curve della Room Temperature. Parallelamente, il caso Ariston dimostra, a fronte di picchi di LWT leggermente più alti, un andamento molto simile a quello Siemens. Le oscillazioni sono tendenzialmente dovute agli spegnimento del generatore in seguito al fenomeno di isteresi presente nell'impianto. Il confronto con l'edificio classe 1 e spessore 28 cm (e di conseguenza sfasamento maggiore) non mette in luce particolari discrepanze. In linea generale, si osserva che

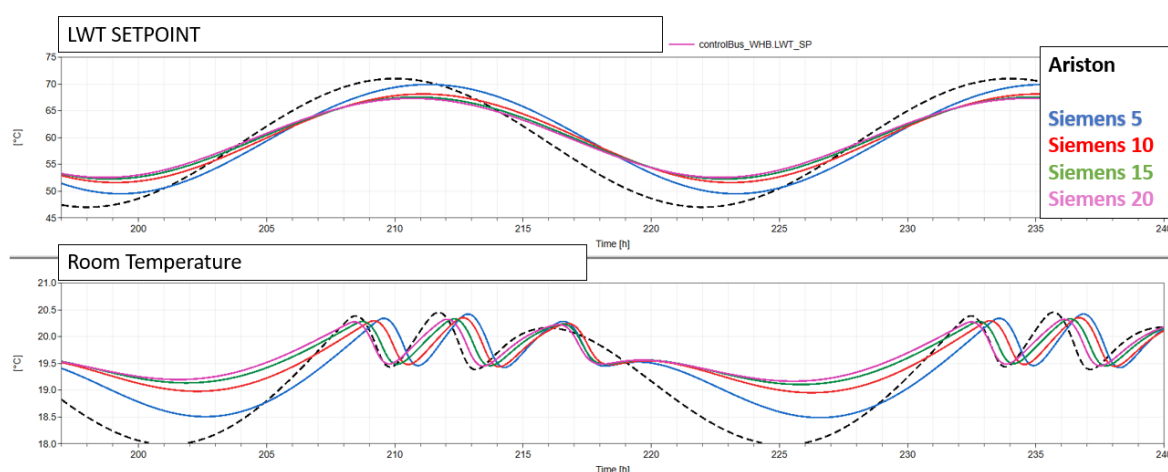


Figura 6.17: Edificio classe 1 con spessore 28 cm

nei due casi sia l'LWT che la Room Temperature seguono dei trend simili, tuttavia la configurazione con costante di tempo pari a 20 h presenta meno oscillazioni, e dunque un mantenimento migliore della temperatura della zona. Non si rileva una dipendenza BCT/sfasamento termico a seconda della tipologia di edificio e dello spessore delle pareti. Per fare un esempio, non è verificata la condizione secondo cui un edificio con un $BCT = 5$ performa meglio con uno sfasamento termico pari a 5 h.

La stessa tendenza si osserva anche nel caso dell'edificio più recente. Di fatto, l'influenza dello sfasamento termico non appare rilevante in questa prima indagine. Le simulazioni con ingresso ad onda quadra seguono il trend delle simulazioni con sinusoidale appena esposte, pertanto non saranno oggetto di approfondimento.

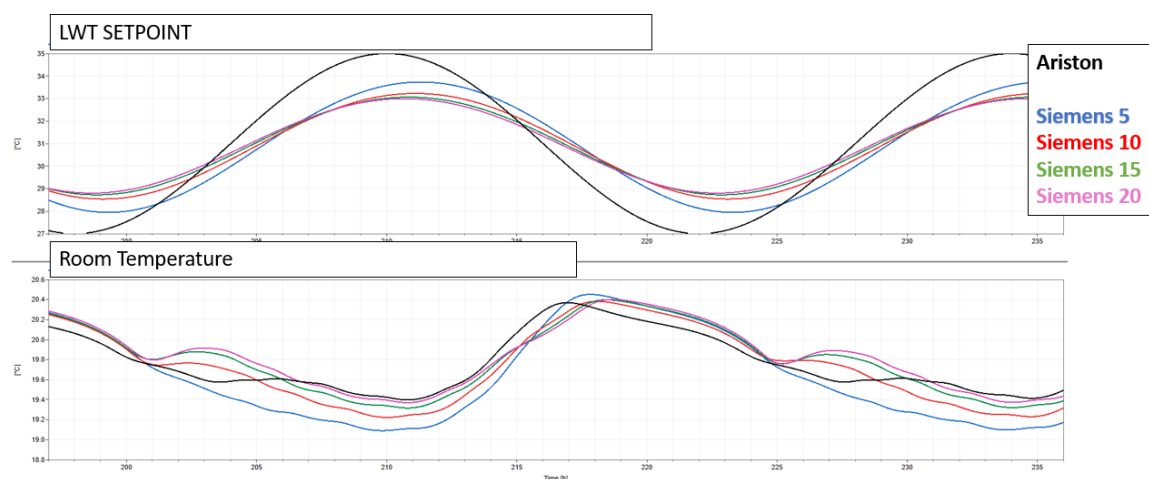


Figura 6.18: Edificio classe 4 con spessore 25 cm

Una possibile soluzione a questa domanda proviene dalla seguente osservazione: L'involucro dell'edificio è chiamato a proteggere gli ambienti interni e i loro occu-

6.2 Risultati simulazioni esplorative sull'influenza dello sfasamento termico

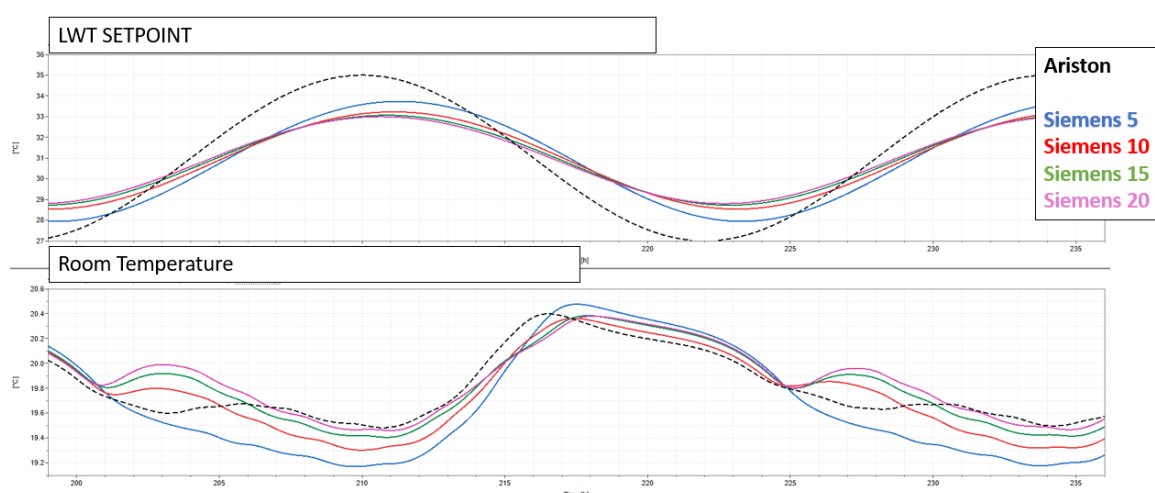


Figura 6.19: Edificio classe 4 con spessore 42 cm

panti sia dal freddo che dal caldo. Il flusso termico, freddo o caldo, attraversa le strutture dell'involucro (con o senza isolamento) proporzionalmente alla sua trasmittanza termica. Se per la fase invernale il comportamento medio climatico è approssimabile a condizioni stazionarie (si fa riferimento, infatti, alla trasmittanza termica stazionaria (U), ovvero la quantità di calore che passa da un ambiente riscaldato ad un ambiente freddo attraverso una data superficie); nella stagione estiva si ha invece una forte oscillazione climatica e pertanto il fattore di riferimento è la trasmittanza termica periodica, che rappresenta la capacità di una struttura opaca di sfasare e attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore. Nel comportamento estivo, pertanto, oltre al contributo resistivo dei materiali presenti nella struttura, è necessario conoscere e valutare anche il contributo inerziale.

In questa fase, lo sfasamento termico svolge la funzione fondamentale di capacità di ritardare (di diverse ore) il calore proveniente dall'esterno e i relativi effetti. Questo vuol dire che l'involucro assorbe buona parte del calore che raggiunge l'edificio durante il giorno (trattenendolo e senza farlo entrare negli ambienti interni) e lo rilascia con intensità minore dopo diverse ore, nelle ore notturne quando il calore esterno si è attenuato.

Da ciò si evince che il parametro sfasamento termico non rende il suo massimo contributo nella fase di riscaldamento invernale, ma nella fase di raffrescamento estiva.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo progetto di tesi, sono stati analizzati e confrontati diversi approcci alla termoregolazione degli impianti climatici mediante sonda esterna. In particolare, sono stati valutati in rapporto un metodo più tradizionale basato su curve di termoregolazione lineari con un approccio differente che sfrutta curve di termoregolazione non lineari basate sulla temperatura esterna composita. Quest'ultima è definita come il contributo della temperatura esterna classica unitamente a quest'ultima filtrata attraverso la costante di tempo dell'edificio, parametro che considera l'inerzia termica dell'edificio e la sua risposta alle variazioni di temperatura esterna. Per raggiungere gli obiettivi di questo studio, sono state intercettate curve di termoregolazione da un regolatore presente sul mercato tramite tecniche di reverse engineering e successivamente è stato implementato un modello Simulink con entrambe le logiche (curve lineari e non lineari con temperatura esterna composita). Le simulazioni comparative hanno messo in luce le differenze, i punti di forza e gli svantaggi dei due approcci. I principali risultati emersi confermano che la differenza tra approccio lineare e non appare minima quando non si considera l'effetto della temperatura esterna composita dell'edificio e quindi la sua inerzia termica, in caso contrario, si possono ottenere performance considerevoli, soprattutto identificando per ogni configurazione di edificio il valore più adatto di costante di tempo dell'edificio. Stabilire con precisione il valore della costante di tempo per ogni edificio in base alle sue caratteristiche costruttive risulta complesso, tuttavia, i risultati suggeriscono che valori compresi tra 10 e 20 ore potrebbero essere adatti alla maggioranza degli edifici attualmente costruiti. Le simulazioni esplorative sull'introduzione dello sfasamento termico nella termoregolazione hanno aumentato la complessità del sistema, confermando che questo parametro richiede ulteriori studi per essere caratterizzato meglio e comprendere il suo effetto sulla regolazione degli impianti climatici. Il lavoro svolto ha aperto diverse prospettive di ricerca e sviluppo per migliorare ulteriormente la termoregolazione degli edifici. Ecco alcune delle direzioni future suggerite:

- Ampliare le casistiche delle simulazioni impiegando generatori come pompe di calore e caldaie a condensazione al posto del generatore ideale, al fine di poter effettuare valutazioni sulle prestazioni energetiche più accurate;
- Sviluppo di metodologie più precise per identificare valori di costante di tempo appropriate in base alla tipologia di edificio e alle caratteristiche costruttive;

- Analisi approfondita dello sfasamento termico e della sua influenza nella termoregolazione outdoor degli impianti climatici, valorizzandone l'impiego per il raffrescamento nei periodi estivi, mentre lasciare spazio al concetto di temperatura esterna composita e costante di tempo dell'edificio per ottimizzare il riscaldamento nei periodi invernali;
- Utilizzare tutta la logica di termoregolazione outdoor implementata per integrarla con il caso indoor (termoregolazione mediante sonda interna che monitora la temperatura ambiente), garantendo una precisione ed un'efficienza maggiore;

In conclusione, questo studio ha dimostrato il potenziale dei modelli di termoregolazione non lineari basati sul concetto di inerzia termica degli edifici. Sebbene la determinazione esatta della costante di tempo dell'edificio rimanga una sfida, i risultati ottenuti offrono una base solida per ulteriori ricerche e sviluppi nel campo della termoregolazione.

Appendice

1 Algoritmi MatLAB/Simulink

1.1 Plot curve di termoregolazione Outdoor non lineari

```
% Costruzione curve specifica Siemens con relativo
    calcolo delle formule polinomiali
% Room setpoint = 18
% BTC = 0

x = [20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30];
x7 = [20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15, -20, -25];
x1 = [20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15, -20];
x2 = [20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15];
x3 = [20, 15, 10, 5, 0, -5, -10];
x4 = [20, 15, 10, 5, 0, -5];
x5 = [20, 15, 10, 5, 0];
x6 = [20, 15, 10, 5];

% Vettori di flowtemp setpoint
% Slope 0.25
y1 = [20.5, 21.8, 23, 24.1, 25.2, 26.2, 27.1, 28, 28.8,
      29.6, 30.3];

% Slope 0.50
y2 = [21, 23.5, 25.7, 27.9, 30, 31.9, 33.7, 35.4, 37,
      38.4, 39.8];

% Slope 0.75
y3 = [21.5, 25.3, 28.7, 32, 35.2, 38.1, 40.9, 43.5, 45.8,
      48, 50];

% Slope 1
y4 = [22, 26.9, 31.5, 35.9, 40, 43.8, 47.5, 50.9, 54,
      56.9, 59.5];
```

Appendice

```
% Slope 1.25
y5 = [22.5, 28.7, 34.5, 40, 45.2, 50, 54.6, 58.9, 62.9,
      66.4, 69.8];

% Slope 1.50
y6 = [23, 30.4, 37.2, 43.8, 50, 55.8, 61.2, 66.3, 71,
      75.3, 79.3];

% Slope 1.75
y7 = [23.6, 32.2, 40.2, 47.9, 55.1, 62, 68.3, 74.3, 79.9,
      84.9, 89.5];

% Slope 2
y8 = [24, 33.8, 43, 51.7, 59.9, 67.7, 74.9, 81.7, 88,
      93.7];

% Slope 2.25
y9 = [24.6, 35.6, 46, 55.9, 65.1, 73.9, 82.1, 89.9, 95];

% Slope 2.50
y10 = [25.1, 37.3, 48.7, 59.6, 69.9, 79.6, 88.7, 95];

% Slope 2.75
y11 = [25.6, 39.1, 51.7, 63.8, 75.1, 85.8, 95];

% Slope 3
y12 = [26.1, 40.8, 54.5, 67.6, 79.9, 91.5];

% Slope 3.25
y13 = [26.6, 42.5, 57.4, 71.7, 85.1];

% Slope 3.50
y14 = [27.1, 44.2, 60.2, 75.5, 89.9];

% Slope 3.75
y15 = [27.6, 46, 63.2, 79.6, 95];

% Slope 4
y16 = [28.1, 47.4, 65.9, 83.4];

% Operazione di regressione polinomiale adattando
```

```

    polinomio di grado 6 ai dati
% forniti. I risultati del comando polyfit sono vettori
    di coefficienti del
% polinomio adattato.
p1 = polyfit(x, y1, 2); % Slope 0.25
p2 = polyfit(x, y2, 2); % Slope 0.5
p3 = polyfit(x, y3, 2); % Slope 0.75
p4 = polyfit(x, y4, 2); % Slope 1
p5 = polyfit(x, y5, 2); % Slope 1.25
p6 = polyfit(x, y6, 2); % Slope 1.5
p7 = polyfit(x, y7, 2); % Slope 1.75
p8 = polyfit(x7, y8, 2); % Slope 2
p9 = polyfit(x1, y9, 2); % Slope 2.25
p10 = polyfit(x2, y10, 2); % Slope 2.50
p11 = polyfit(x3, y11, 2); % Slope 2.75
p12 = polyfit(x4, y12, 2); % Slope 3
p13 = polyfit(x5, y13, 2); % Slope 3.25
p14 = polyfit(x5, y14, 2); % Slope 3.50
p15 = polyfit(x5, y15, 2); % Slope 3.75
p16 = polyfit(x6, y16, 2); % Slope 4

x_plot1 = linspace(min(x), max(x), 100); % Calcolo
    vettore x

% Valutazione polinomio in ogni punto di x_plot1
y_plot1 = polyval(p1, x_plot1);
y_plot2 = polyval(p2, x_plot1);
y_plot3= polyval(p3, x_plot1);
y_plot4 = polyval(p4, x_plot1);
y_plot5 = polyval(p5, x_plot1);
y_plot6 = polyval(p6, x_plot1);
y_plot7 = polyval(p7, x_plot1);
y_plot8 = polyval(p8, x_plot1);
y_plot9 = polyval(p9, x_plot1);
y_plot10 = polyval(p10, x_plot1);
y_plot11 = polyval(p11, x_plot1);
y_plot12 = polyval(p12, x_plot1);
y_plot13 = polyval(p13, x_plot1);
y_plot14 = polyval(p14, x_plot1);
y_plot15 = polyval(p15, x_plot1);
y_plot16 = polyval(p16, x_plot1);

```

```
% Plot delle curve polinomiali interpolate
figure;
plot(x_plot1, y_plot1, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
grid('on');
hold on;
plot(x_plot1, y_plot2, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot3, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot4, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot5, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot6, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot7, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot8, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot9, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot10, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot11, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot12, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot13, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
```

```

plot(x_plot1, y_plot14, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot15, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')
hold on;
plot(x_plot1, y_plot16, 'k');
set(gca, 'XDir','reverse')

xlabel('Outdoor Temperature (C)');
ylabel('Flow Temperature Setpoint (C)');

% Scala grafico
xlim([-30 20]);
ylim([20 100]);
xticks(-30:5:20);
yticks(linspace(20,100,9));

% Polinomio curva slope 0.25
polynomial_str = poly2str(p1, 'x');
fprintf('y1 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p1);

% Polinomio curva slope 0.50
polynomial_str2 = poly2str(p2, 'x');
fprintf('y2 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p2);

% Polinomio cirva slope 0.75
polynomial_str3 = poly2str(p3, 'x');
fprintf('y3 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p3);

% Polinomio curva slope 1
polynomial_str4 = poly2str(p4, 'x');
fprintf('y4 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p4);

% Polinomio curva slope 1.25
polynomial_str5 = poly2str(p5, 'x');
fprintf('y5 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p5);

% Polinomio curva slope 1.50
polynomial_str6 = poly2str(p6, 'x');
fprintf('y6 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p6);

```

```
% Polinomio curva slope 1.75
polynomial_str7 = poly2str(p7, 'x');
fprintf('y7 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p7);

% Polinomio curva slope 2
polynomial_str8 = poly2str(p8, 'x');
fprintf('y8 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p8);

% Polinomio curva slope 2.25
polynomial_str9 = poly2str(p9, 'x');
fprintf('y9 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p9);

% Polinomio curva slope 2.50
polynomial_str10 = poly2str(p10, 'x');
fprintf('y10 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p10);

% Polinomio curva slope 2.75
polynomial_str11 = poly2str(p11, 'x');
fprintf('y11 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p11);

% Polinomio curva slope 3
polynomial_str12 = poly2str(p12, 'x');
fprintf('y12 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p12);

% Polinomio curva slope 3.25
polynomial_str13 = poly2str(p13, 'x');
fprintf('y13 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p13);

% Polinomio curva slope 3.50
polynomial_str14 = poly2str(p14, 'x');
fprintf('y14 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p14);

% Polinomio curva slope 3.75
polynomial_str15 = poly2str(p15, 'x');
fprintf('y15 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p15);

% Polinomio curva slope 4
polynomial_str16 = poly2str(p16, 'x');
fprintf('y16 = %.4e x^2 + %.4e x + %.4f\n', p16);
```

1.2 Validazione curve di termoregolazione Outdoor

```

function t_flow = curve_selector(t_outdoor, slope)
slope_values = [0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2,
    2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4];
if ~ismember(slope, slope_values)
    error('Slope non valido. Seleziona uno slope tra 0.25
        e 4. ');

end

index = find(slope == slope_values);

switch slope
case 0.25
    index = 1;
case 0.5
    index = 2;
case 0.75
    index = 3;
case 1
    index = 4;
case 1.25
    index = 5;
case 1.5
    index = 6;
case 1.75
    index = 7;
case 2
    index = 8;
case 2.25
    index = 9;
case 2.5
    index = 10;
case 2.75
    index = 11;
case 3
    index = 12;
case 3.25
    index = 13;
case 3.5
    index = 14;
case 3.75
    index = 15;

```

```
case 4
    index = 16;
otherwise
    error('Slope non gestito.');
```

end

```
coefficients = [
    -1.2448e-03, -2.0754e-01, 25.1773;
    -2.3963e-03, -3.9887e-01, 29.9646;
    -3.7809e-03, -6.0745e-01, 35.1843;
    -4.9650e-03, -7.9965e-01, 39.9944;
    -6.2424e-03, -1.0073e+00, 45.1800;
    -7.4079e-03, -1.1990e+00, 49.9786;
    -8.6154e-03, -1.4051e+00, 55.1530;
    -9.8636e-03, -1.5979e+00, 59.9412;
    -1.3251e-02, -1.7823e+00, 65.3307;
    -1.5643e-02, -1.9439e+00, 69.9982;
    -1.5524e-02, -2.1662e+00, 75.0714;
    -1.5071e-02, -2.3876e+00, 79.9207;
    -1.6000e-02, -2.6040e+00, 85.1000;
    -1.7429e-02, -2.7894e+00, 89.8886;
    -1.9429e-02, -2.9794e+00, 94.9886;
    -1.8000e-02, -3.2380e+00, 100.0500;
];

t_flow = polyval(coefficients(index, :), t_outdoor);
```

1.3 Script per simulazioni di termoregolazione Outdoor

```
addpath("slprj\","script\","results\","plant_fmu\","
    model\","data\");
time_sim = 86400 * 10; % sim duration (86400 sec = 1 day)
t_samp = 30; % sample time

%% Parametri formule termoreg Ariston
Zone_i_slope = 0.4; % Slope per curve Ariston
Global_outdoor_temp = -5;
Zone_i_Offset_Temp = 3; % Offset curve Ariston
Zone_i_Min_Temp = 20;
Zone_i_Max_Temp = 45;
Zone_i_Room_influence = 10;
```

```

TR_mode = 0; % modalita' di calcolo e di logica di
             controllo (0 outdoor, 1 indoor, 2 indoor+outdoor)
%%

% Offset parallel displacement curva Siemens
offset = 1;

% 1 curve Ariston, 0 curve Siemens
curves_logic = 0;

% Definizione slope curva Siemens
slope = 0.5;

% Definizione valori di building time constant
BCT_tot = [5, 10, 15, 20];
BCT = 5;

simulink_name = 'model_TR_single_zone';
open('model_TR_single_zone.slx') % apre il modello
    simulink
fmudialog.createBusType('model_TR_single_zone/FMU');

for i=1:length(BCT_tot)
    BCT = BCT_tot(i);
    cd('D:\dati\desktop\termoregulation_project\results\
        simulazioni sfasamento\Sim Onda quadra\Curve
        Siemens\Sim4 (2010)\42cm\')
    mkdir ([simulink_name num2str(i)]);
    cd(['BCT ' num2str(BCT_tot(i))]);
    sim([simulink_name '.slx']);
end

cd('D:\dati\desktop\termoregulation_project\results') %
    imposta "results" come cartella corrente, in modo che
    il file dei risultati venga salvato li'
sim('D:\dati\desktop\termoregulation_project\model\
    model_TR_single_zone')

```

1.4 Script per analisi numerica delle simulazioni di termoregolazione Outdoor

```

function [Energy,Table2] = analysis_HP_single_zn(time_s,
    filter,CH_target,thermal_zone_1zone,thermostat_ONOFF,
    T_supply,T_return)

%% electric energy
EL_price.buy = 0.41;
EL_price.sell = 0.05;
GAS_price.buy = 1.6;
time_threshold_to_delete_before = 5*86400;
time_threshold_to_delete_after = 10*86400;
num_days = (time_threshold_to_delete_after -
    time_threshold_to_delete_before)/86400;
time_idx = find(time_s>=time_threshold_to_delete_before &
    time_s<=time_threshold_to_delete_after);
time_s = time_s(time_idx);
% time_s = time_s';
time_s = time_s'- time_s(1);
time_diff = [0 diff(time_s)];
n_hp = 1; % n_HP_HeaCoo+n_HP_DHW;

idx = find(thermostat_ONOFF.y(time_idx)>0);
dtime = [0 diff(time_s)];
generator_powerON_time = NaN(length(time_s),1);
generator_powerON_time(idx) = cumsum(dtime(idx))/3600;
generator_powerON_time(1)=0;
for i=2:length(generator_powerON_time)
    if isnan(generator_powerON_time(i))
        generator_powerON_time(i)=generator_powerON_time(
            i-1);
    end
end

%% Calcolo tempo accensione generatore
Energy.Electrical.generator_powerON_time =
    generator_powerON_time;

%% Calcolo cicli on off
on_off = diff(thermostat_ONOFF.y(time_idx));

cicli_on_off = length(find(on_off>0));

idx = find(thermostat_ONOFF.y(time_idx));

```

```
%% Calcolo LWT media
LWT = mean( T_supply.T(idx))-273.15;

%% Calcolo temperatura ambiente media
T_room = mean(filter.y)-273.15;

%% Plot tabelle
Table2 = struct;

Table2.Sim_duration = (time_s(end)-time_s(1))/86400;

Table2.generator_powerON_time = generator_powerON_time(
    end);

Table2.cicli_on_off = cicli_on_off;

Table2.LWT = LWT;

Table2.T_room = T_room;
```

2 Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane

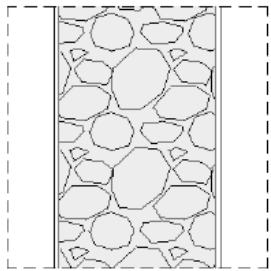
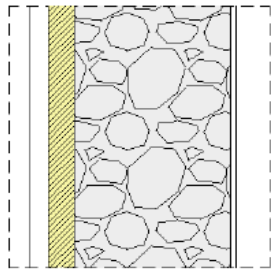
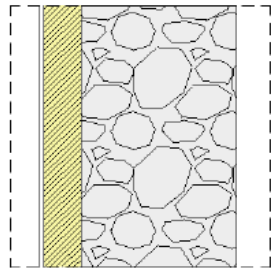
Muratura in Pietra	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	20	460.0	3.404	0.481	5.49	1.6376
	24	560.0	3.221	0.391	6.42	1.2578
	29	685.0	3.018	0.303	7.57	0.9149
	34	810.0	2.840	0.236	8.72	0.6709
	39	935.0	2.681	0.184	9.89	0.4936
	44	1060.0	2.539	0.143	11.06	0.3634
	54	1310.0	2.296	0.086	13.41	0.1967
	64	1560.0	2.096	0.051	15.76	0.1063
 mediamente isolato	25	463.3	0.625	0.344	7.13	0.2151
	29	563.3	0.619	0.264	8.03	0.1636
	34	688.3	0.611	0.194	9.14	0.1187
	39	813.3	0.603	0.144	10.28	0.0872
	44	938.3	0.595	0.108	11.43	0.0643
	49	1063.3	0.588	0.080	12.60	0.0474
	59	1313.3	0.574	0.045	14.96	0.0257
	69	1563.3	0.560	0.025	17.31	0.0139
 isolato	89	2063.3	0.535	0.008	22.01	0.0040
	30	466.5	0.345	0.328	7.79	0.1130
	34	566.5	0.343	0.251	8.69	0.0859
	39	691.5	0.340	0.183	9.80	0.0624
	44	816.5	0.338	0.136	10.94	0.0458
	49	941.5	0.336	0.101	12.09	0.0338
	54	1066.5	0.333	0.075	13.26	0.0249
	64	1316.5	0.329	0.041	15.62	0.0135
	74	1566.5	0.324	0.022	17.97	0.0073
	94	2066.5	0.315	0.007	22.67	0.0021

Tabella 1: Caratteristiche termiche muratura in pietra

2 Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane

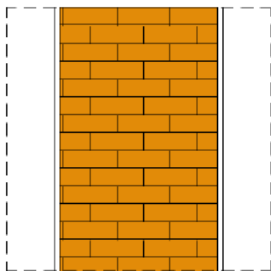
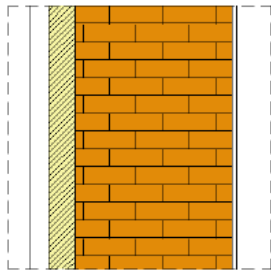
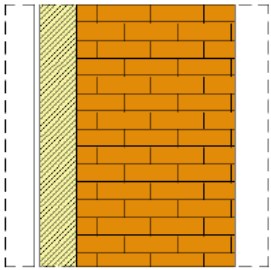
Muratura in Mattoni	s [cm]	Ms kg/m ²	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	20	348.0	2.313	0.558	5.88	1.2908
	24	420.0	2.068	0.445	7.18	0.9194
	29	510.0	1.826	0.330	8.79	0.6021
	34	600.0	1.635	0.242	10.39	0.3952
	39	690.0	1.480	0.176	11.99	0.2597
	44	780.0	1.351	0.126	13.59	0.1707
	54	960.0	1.152	0.064	16.80	0.0737
	64	1140.0	1.004	0.032	20.00	0.0319
 mediamente isolato	25	351.3	0.575	0.371	7.74	0.2135
	29	423.3	0.558	0.268	9.02	0.1499
	34	513.3	0.538	0.181	10.60	0.0977
	39	603.3	0.520	0.123	12.19	0.0642
	44	693.3	0.503	0.084	13.79	0.0422
	49	783.3	0.487	0.057	15.39	0.0278
	59	963.3	0.458	0.026	18.60	0.0120
	69	1143.3	0.433	0.012	21.81	0.0052
 isolato	30	354.5	0.329	0.345	8.46	0.1135
	34	426.5	0.323	0.246	9.74	0.0796
	39	516.5	0.317	0.164	11.32	0.0519
	44	606.5	0.310	0.110	12.91	0.0341
	49	696.5	0.304	0.074	14.51	0.0225
	54	786.5	0.298	0.049	16.11	0.0148
	64	966.5	0.287	0.022	19.32	0.0064
	74	1146.5	0.277	0.010	22.52	0.0028

Tabella 2: Caratteristiche termiche muratura in mattoni

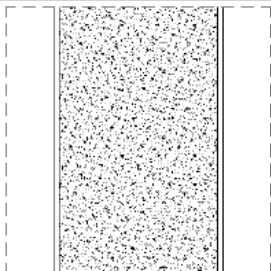
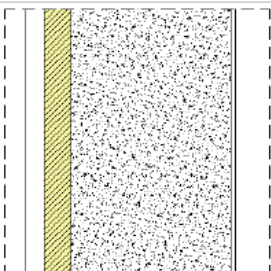
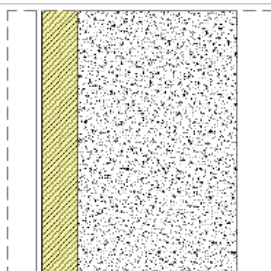
Muratura in Calcestruzzo	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	24	540.0	2.900	0.376	6.97	1.0893
	29	660.0	2.672	0.283	8.32	0.7568
	34	780.0	2.478	0.213	9.67	0.5286
	44	1020.0	2.162	0.120	12.40	0.2586
	54	1260.0	1.918	0.066	15.14	0.1264
	64	1500.0	1.724	0.036	17.88	0.0617
 mediamente isolato	29	543.3	0.606	0.243	8.61	0.1477
	34	663.3	0.595	0.172	9.93	0.1025
	39	783.3	0.584	0.122	11.27	0.0717
	49	1023.3	0.565	0.062	14.00	0.0352
	59	1263.3	0.546	0.031	16.74	0.0172
	69	1503.3	0.529	0.016	19.48	0.0084
 isolato	34	546.5	0.339	0.229	9.28	0.0777
	39	666.5	0.335	0.161	10.60	0.0540
	44	786.5	0.332	0.114	11.94	0.0378
	54	1026.5	0.326	0.057	14.67	0.0185
	64	1266.5	0.319	0.028	17.41	0.0091
	74	1506.5	0.313	0.014	20.15	0.0044

Tabella 3: Caratteristiche termiche muratura in calcestruzzo

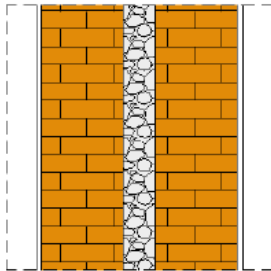
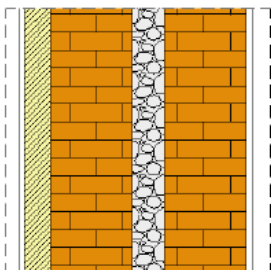
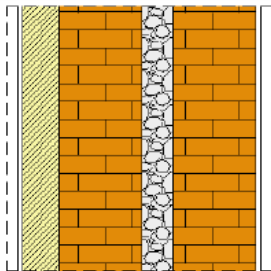
Muratura a sacco in mattoni	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	41	761.0	1.519	0.146	12.37	0.2215
	46	886.0	1.473	0.105	13.49	0.1541
	49	905.0	1.314	0.087	14.93	0.1140
	54	1030.0	1.279	0.062	16.07	0.0795
	59	1085.0	1.125	0.044	18.15	0.0494
	64	1210.0	1.099	0.031	19.30	0.0345
	69	1265.0	0.983	0.022	21.37	0.0213
	74	1390.0	0.963	0.015	22.51	0.0149
 mediamente isolato	46	764.3	0.508	0.071	14.14	0.0364
	51	889.3	0.502	0.051	15.27	0.0255
	54	908.3	0.482	0.039	16.74	0.0187
	59	1033.3	0.477	0.027	17.88	0.0131
	64	1088.3	0.454	0.018	19.97	0.0081
	69	1213.3	0.450	0.012	21.11	0.0056
	74	1268.3	0.429	0.008	23.18	0.0035
 isolato	51	767.5	0.306	0.063	14.86	0.0194
	56	892.5	0.304	0.045	15.98	0.0136
	59	911.5	0.296	0.033	17.46	0.0099
	64	1036.5	0.294	0.024	18.60	0.0069
	69	1091.5	0.285	0.015	20.68	0.0043
	74	1216.5	0.284	0.011	21.83	0.0030

Tabella 4: Caratteristiche termiche muratura a sacco in mattoni

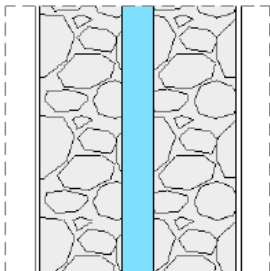
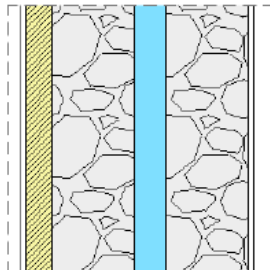
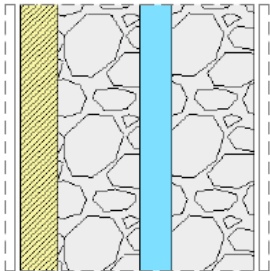
Muratura a cassa vuota in pietra	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	41	860.0	1.850	0.125	11.46	0.2312
	46	860.0	1.850	0.125	11.46	0.2312
	49	1060.0	1.743	0.078	13.25	0.1356
	54	1060.0	1.743	0.078	13.25	0.1356
	59	1310.0	1.625	0.044	15.48	0.0721
	64	1310.0	1.625	0.044	15.48	0.0721
	69	1560.0	1.522	0.026	17.76	0.0390
	74	1560.0	1.522	0.026	17.76	0.0390
	79	1810.0	1.431	0.015	20.08	0.0212
	84	1810.0	1.431	0.015	20.08	0.0212
	89	2060.0	1.350	0.009	22.43	0.0115
	94	2060.0	1.350	0.009	22.43	0.0115
 mediamente isolato	41	863.3	0.600	0.071	12.63	0.0426
	46	863.3	0.540	0.054	13.15	0.0295
	49	1063.3	0.588	0.042	14.34	0.0249
	54	1063.3	0.531	0.041	14.40	0.0219
	59	1313.3	0.574	0.023	16.52	0.0133
	64	1313.3	0.519	0.022	16.58	0.0117
	69	1563.3	0.560	0.013	18.78	0.0072
	74	1563.3	0.508	0.013	18.84	0.0064
	79	1813.3	0.547	0.007	21.10	0.0040
	84	1813.3	0.497	0.007	21.16	0.0035
	89	2063.3	0.535	0.004	23.45	0.0022
	94	2063.3	0.487	0.004	23.51	0.0019
 isolato	51	866.5	0.317	0.049	13.81	0.0155
	56	866.5	0.317	0.049	13.81	0.0155
	59	1066.5	0.314	0.029	15.51	0.0091
	64	1066.5	0.314	0.029	15.51	0.0091
	69	1316.5	0.310	0.016	17.69	0.0049
	74	1316.5	0.310	0.016	17.69	0.0049
	79	1566.5	0.306	0.009	19.95	0.0027
	84	1566.5	0.306	0.009	19.95	0.0027
	89	1816.5	0.302	0.005	22.28	0.0015
	94	1816.5	0.302	0.005	22.28	0.0015

Tabella 5: Caratteristiche termiche muratura a cassa vuota in pietra

2 Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane

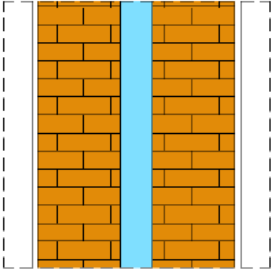
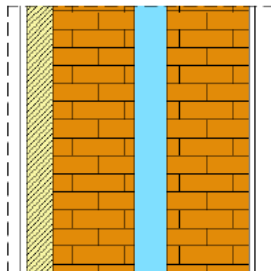
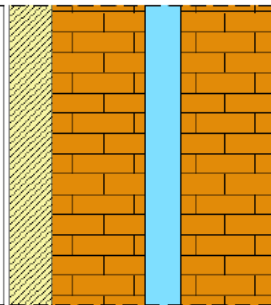
Muratura a cassa vuota in mattoni	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	41	636	1.223	0.164	12.42	0.2005
	46	636	1.223	0.164	12.42	0.2005
	49	780	1.087	0.093	14.98	0.1011
	54	780	1.087	0.093	14.98	0.1011
	59	960	0.954	0.046	18.17	0.0434
	64	960	0.954	0.046	18.17	0.0434
	69	1140	0.850	0.022	21.36	0.0188
 mediamente isolato	41	639.25	0.513	0.097	13.95	0.0498
	46	636.75	0.822	0.115	13.34	0.1140
	49	783.25	0.487	0.051	16.48	0.0249
	54	783.25	0.448	0.049	16.56	0.0221
	59	963.25	0.458	0.023	19.63	0.0107
	64	963.25	0.423	0.022	19.72	0.0095
	69	1143.25	0.433	0.011	22.82	0.0046
 isolato	74	1143.25	0.401	0.010	22.91	0.0041
	51	642.5	0.291	0.058	14.99	0.0170
	56	642.5	0.291	0.058	14.99	0.0170
	59	786.5	0.283	0.030	17.50	0.0086
	64	786.5	0.283	0.030	17.50	0.0086
	69	966.5	0.273	0.014	20.67	0.0037
	74	966.5	0.273	0.014	20.67	0.0037
	79	1143	0.232	0.006	23.70	0.0014
	84	1143	0.232	0.006	23.70	0.0014

Tabella 6: Caratteristiche termiche muratura a cassa vuota in mattoni

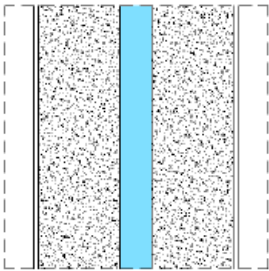
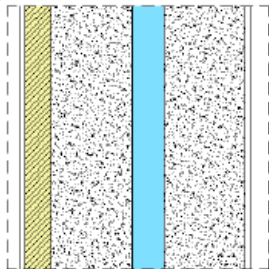
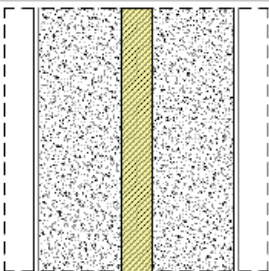
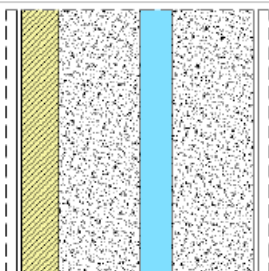
Parete in Calcestruzzo	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	49	1020.0	1.557	0.070	14.35	0.1087
	54	1020.0	1.557	0.070	14.35	0.1087
	59	1260.0	1.426	0.037	17.01	0.0528
	64	1260.0	1.426	0.037	17.01	0.0528
	69	1500.0	1.316	0.020	19.71	0.0259
	74	1500.0	1.316	0.020	19.71	0.0259
 mediamente isolato	54	1023.3	0.512	0.028	15.97	0.0145
	59	1023.3	0.512	0.028	15.97	0.0145
	64	1263.3	0.497	0.014	18.60	0.0071
	69	1263.3	0.497	0.014	18.60	0.0071
	74	1503.3	0.482	0.007	21.30	0.0035
	79	1503.3	0.482	0.007	21.30	0.0035
 mediamente isolato	49	1023.3	0.565	0.04	15.52	0.0211
	54	1023.3	0.51	0.04	15.59	0.0187
	59	1263.3	0.55	0.02	18.14	0.0103
	64	1263.3	0.50	0.02	18.21	0.0091
	69	1503.3	0.53	0.01	20.83	0.0051
	74	1503.3	0.48	0.01	20.90	0.0045
 isolato	59	1026.5	0.307	0.02	16.64	0.0076
	64	1026.5	0.31	0.02	16.64	0.0076
	69	1266.5	0.30	0.01	19.27	0.0038
	74	1266.5	0.30	0.01	19.27	0.0038
	79	1506.5	0.30	0.01	21.97	0.0019
	84	1506.5	0.30	0.01	21.97	0.0019

Tabella 7: Caratteristiche termiche parete in calcestruzzo

2 Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane

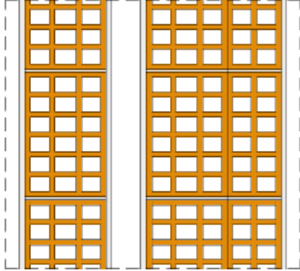
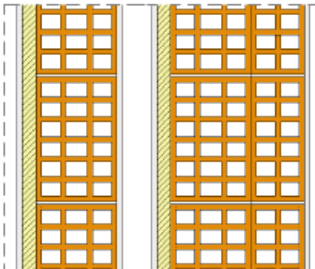
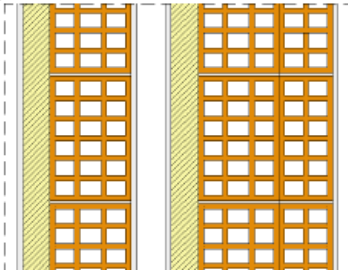
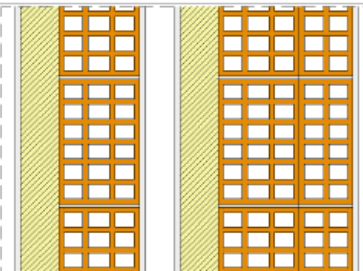
Parete in laterizio		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		19	174.0	1.48	0.75	4.63	1.113
		29	248.8	0.96	0.46	8.13	0.442
		34	288.0	0.89	0.37	9.44	0.324
		44	362.8	0.67	0.19	12.94	0.128
 scarsamente isolato		21	175.3	0.829	0.62	5.94	0,5149
		31	250.1	0.634	0.32	9.52	0,2004
		36	289.3	0.603	0.24	10.82	0,1440
		46	364.1	0.493	0.12	14.31	0,0580
	mediamente isolato	24	177.3	0.503	0.55	6.61	0,2762
		34	252.0	0.423	0.25	10.20	0,1064
		39	291.3	0.409	0.19	11.48	0,0760
		49	366.0	0.355	0.09	14.97	0,0308
 isolato		29	180.5	0.304	0.40	7.70	0.1213
		39	255.3	0.273	0.17	11.21	0.0477
		44	294.5	0.267	0.13	12.49	0.0338
		54	369.3	0.243	0.06	16.00	0.0137
 altamente isolato		33	183.1	0.231	0.37	8.47	0.0859
		43	257.9	0.212	0.16	11.97	0.0337
		48	297.1	0.209	0.11	13.25	0.0239
		58	371.9	0.194	0.05	16.77	0.0097

Tabella 8: Caratteristiche termiche parete in laterizio

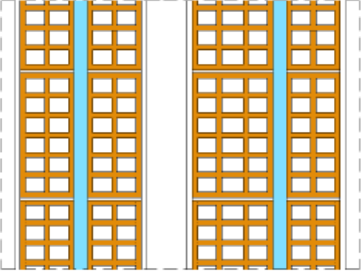
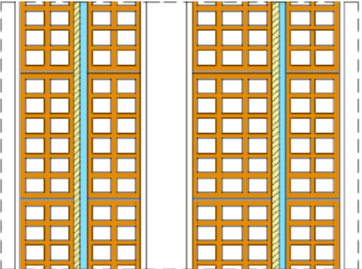
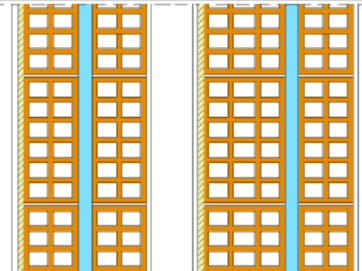
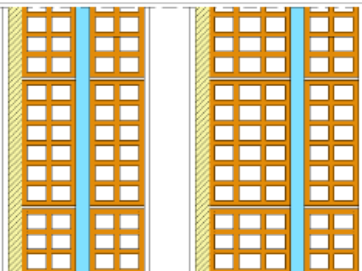
Parete a cassetta	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	39	288.0	0.765	0.34	10.14	0.2584
	44	288.0	0.765	0.34	10.14	0.2584
	49	362.8	0.596	0.17	13.64	0.1020
	54	362.8	0.596	0.17	13.64	0.1020
	59	437.5	0.489	0.08	17.18	0.0398
	64	437.5	0.489	0.08	17.18	0.0398
 scarsamente isolato	39	289.3	0.544	0.28	11.19	0.1516
	44	289.3	0.544	0.28	11.19	0.1516
	49	364.1	0.453	0.13	14.70	0.0597
	54	364.1	0.453	0.13	14.70	0.0597
	59	438.8	0.388	0.06	18.27	0.0231
	64	438.8	0.388	0.06	18.27	0.0231
 debolmente isolato	41	289.3	0.544	0.21	11.58	0.1143
	46	289.3	0.544	0.21	11.58	0.1143
	51	364.1	0.453	0.10	15.00	0.0461
	56	364.1	0.453	0.10	15.00	0.0461
	61	438.8	0.388	0.05	18.54	0.0180
	66	438.8	0.388	0.05	18.54	0.0180
 mediamente isolato	44	291.3	0.381	0.16	12.25	0.0601
	49	291.3	0.381	0.16	12.25	0.0601
	54	366.0	0.334	0.07	15.67	0.0245
	59	366.0	0.334	0.07	15.67	0.0245
	64	440.8	0.297	0.03	19.21	0.0096
	69	440.8	0.297	0.03	19.21	0.0096

Tabella 9: Caratteristiche termiche parete a cassetta

2 Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane

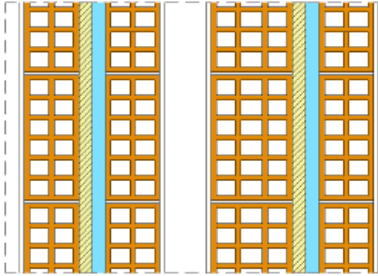
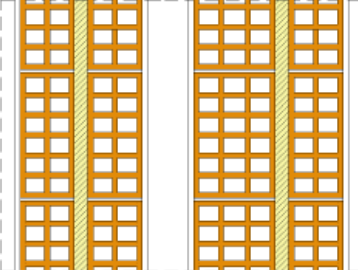
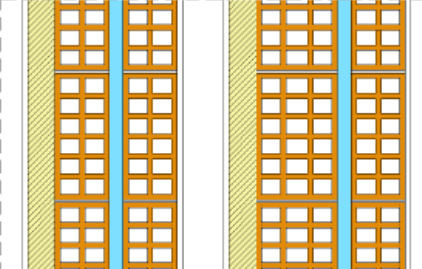
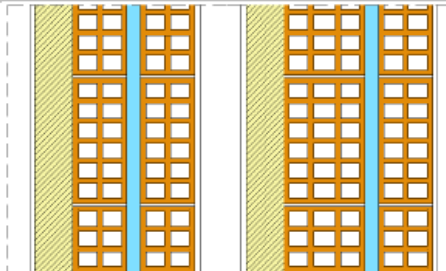
Parete a cassetta	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
	44	291.3	0.381	0.24	11.94	0.0904
	54	366.0	0.334	0.11	15.45	0.0355
	64	440.8	0.297	0.05	19.03	0.0137
	39	291.3	0.409	0.24	11.82	0.0996
	49	366.0	0.355	0.11	15.33	0.0392
	59	440.8	0.314	0.05	18.91	0.0151
	49	294.5	0.254	0.10	13.29	0.0266
	54	294.5	0.254	0.10	13.29	0.0266
	59	369.3	0.232	0.04	16.80	0.0105
	64	369.3	0.232	0.04	16.80	0.0105
	69	444.0	0.214	0.02	20.22	0.0043
	74	444.0	0.214	0.02	20.22	0.0043
	53	297.1	0.201	0.09	14.06	0.0188
	58	297.1	0.201	0.09	14.06	0.0188
	63	371.9	0.187	0.04	17.56	0.0074
	68	371.9	0.187	0.04	17.56	0.0074
	73	446.6	0.175	0.02	20.99	0.0030
	78	446.6	0.175	0.02	20.99	0.0030

Tabella 10: Caratteristiche termiche parete a cassetta

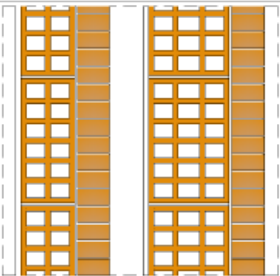
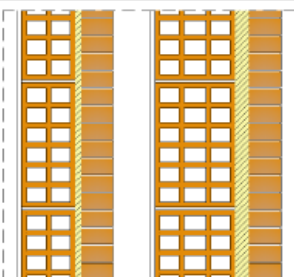
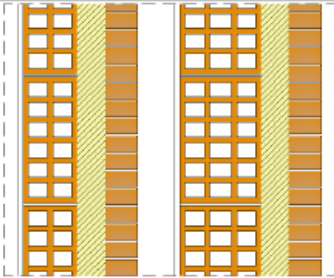
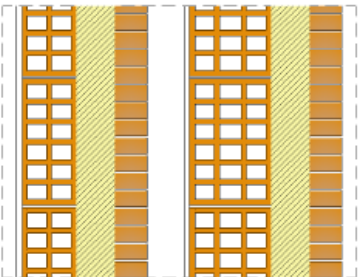
Parete con paramento in mattoni - 1		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		29	360.0	1.246	0.45	8.22	0.5619
		39	434.8	0.853	0.26	11.72	0.2227
 scarsamente isolato		31	361.3	0.751	0.34	9.95	0.2567
		41	436.1	0.588	0.17	13.46	0.1012
	mediamente isolato	34	363.3	0.473	0.28	10.74	0.1342
		44	438.0	0.402	0.13	14.24	0.0528
 isolato		39	366.5	0.293	0.25	11.62	0.0724
		49	441.3	0.264	0.11	15.12	0.0284
 altamente isolato		43	369.1	0.224	0.23	12.41	0.0512
		53	443.9	0.207	0.10	15.91	0.0201

Tabella 11: Caratteristiche termiche parete con paramento in mattoni - 1

2 Caratteristiche termiche strutture verticali opache italiane

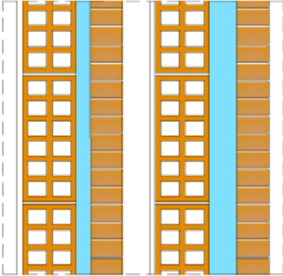
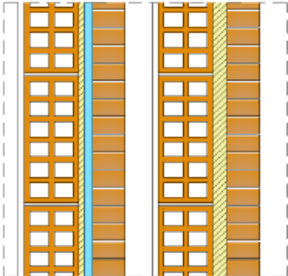
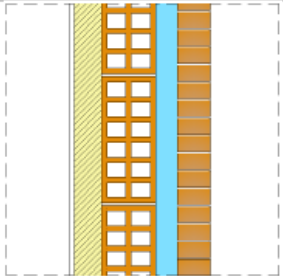
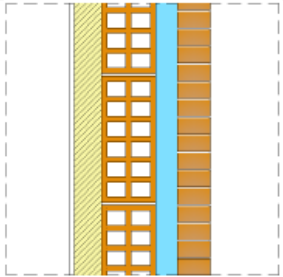
Parete con paramento in mattoni - 2		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		34	360.0	1.02	0.40	9.11	0.411
		39	360.0	1.02	0.40	9.11	0.411
		44	434.8	0.74	0.22	12.62	0.162
		49	434.8	0.74	0.22	12.62	0.162
 scarsamente isolato mediamente isolato		34	361.3	0.66	0.32	10.19	0.213
		39	361.3	0.66	0.32	10.19	0.213
		44	436.1	0.53	0.16	13.69	0.084
		49	436.1	0.53	0.16	13.69	0.084
		39	363.3	0.44	0.28	10.85	0.121
		49	438.0	0.37	0.13	14.35	0.047
		34	363.3	0.47	0.28	10.74	0.134
		44	438.0	0.40	0.13	14.24	0.053
 isolato		44	366.5	0.28	0.19	12.06	0.053
		49	366.5	0.28	0.19	12.06	0.053
		54	441.3	0.25	0.08	15.49	0.021
		59	441.3	0.25	0.08	15.49	0.021
 altamente isolato		48	369.1	0.22	0.17	12.85	0.038
		53	369.1	0.22	0.17	12.85	0.038
		58	443.9	0.20	0.08	16.28	0.015
		63	443.9	0.20	0.08	16.28	0.015

Tabella 12: Caratteristiche termiche parete con paramento in mattoni - 2

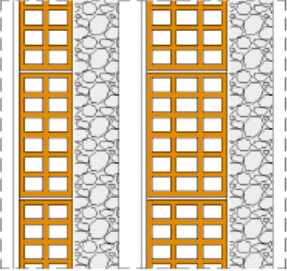
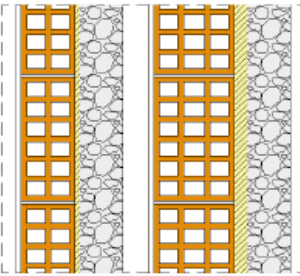
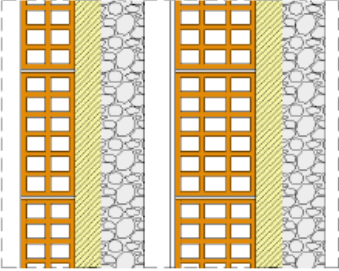
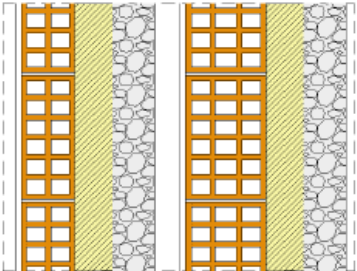
Parete con paramento in pietra - 1		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		33	544.0	1.397	0.38	8.81	0.526
		43	618.8	0.922	0.23	12.30	0.209
 scarsamente isolato mediamente isolato		35	545.3	0.804	0.27	10.75	0.215
		45	620.1	0.619	0.14	14.26	0.085
		38	547.3	0.493	0.22	11.50	0.108
		48	622.0	0.417	0.10	15.01	0.042
 isolato		43	550.5	0.300	0.19	12.34	0.057
		53	625.3	0.270	0.08	15.85	0.023
 altamente isolato		47	553.1	0.229	0.18	13.11	0.040
		57	627.9	0.211	0.08	16.62	0.016

Tabella 13: Caratteristiche termiche parete con paramento in pietra - 1

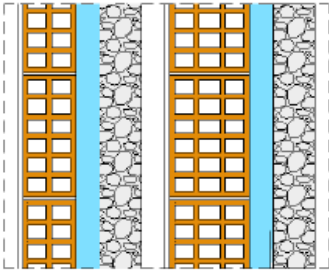
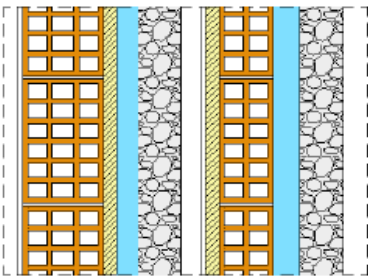
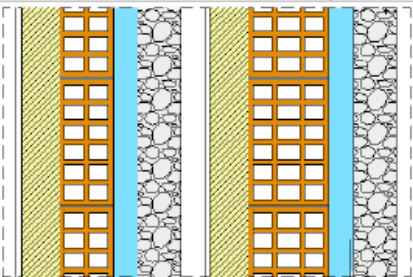
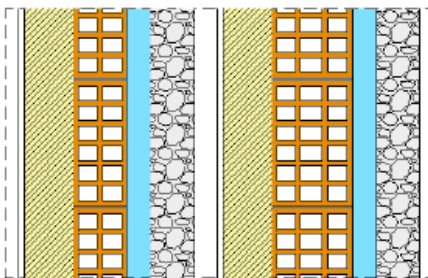
Parete con paramento in pietra - 2		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		38	544.0	1.116	0.33	9.87	0.3636
		43	544.0	1.116	0.33	9.87	0.3636
		48	618.8	0.791	0.18	13.37	0.1439
		53	618.8	0.791	0.18	13.37	0.1439
 scarsamente isolato mediamente isolato		38	545.3	0.702	0.25	10.98	0.1758
		43	545.3	0.702	0.25	10.98	0.1758
		48	620.1	0.557	0.12	14.49	0.0692
		53	620.1	0.557	0.12	14.49	0.0692
		38	547.3	0.493	0.22	11.50	0.1081
		43	547.3	0.453	0.19	11.97	0.0872
		48	584.6	0.435	0.15	13.49	0.0648
		53	622.0	0.387	0.09	15.42	0.0345
		58	622.0	0.387	0.09	15.42	0.0345
		43	547.3	0.453	0.21	11.61	0.0966
		53	622.0	0.387	0.10	15.12	0.0380
 isolato		48	550.5	0.285	0.17	12.81	0.0475
		53	550.5	0.285	0.17	12.81	0.0475
		58	625.3	0.257	0.07	16.26	0.0189
		63	625.3	0.257	0.07	16.26	0.0189
 altamente isolato		52	553.1	0.220	0.15	13.60	0.0338
		57	553.1	0.220	0.15	13.60	0.0338
		62	627.9	0.203	0.07	17.05	0.0134
		67	627.9	0.203	0.07	17.05	0.0134

Tabella 14: Caratteristiche termiche parete con paramento in pietra - 2

Bibliografia

- [1] Idraulica 33 Caleffi. *Le pompe di calore*. Poligrafica Moderna S.p.A., Novara. Pubblicazione registrata presso il Tribunale di Novara al n. 26/91 in data 28/9/91, 2007. https://www.caleffi.com/sites/default/files/media/external-file/Idraulica_33_IT_Le%20pompe%20di%20calore%20.pdf.
- [2] Idraulica 56 Caleffi. *La regolazione degli impianti*. Centrostamp S.r.l., Novara. Pubblicazione registrata presso il Tribunale di Novara al n. 26/91 in data 28/9/91, 2019. <https://idraulica.caleffi.com/rivista/56-la-regolazione-degli-impianti>.
- [3] Idraulica 57 Caleffi. *Strategie di regolazione degli impianti*. La Terra Promessa Onlus - Novara. Pubblicazione registrata presso il Tribunale di Novara al n. 26/91 in data 28/9/91, 2019. <https://idraulica.caleffi.com/rivista/57-strategie-di-regolazione-degli-impianti>.
- [4] Idraulica 61 Caleffi. *Gli impianti a pompa di calore aria-acqua*. La Terra Promessa Onlus - Novara. Pubblicazione registrata presso il Tribunale di Novara al n. 26/91 in data 28/9/91, 2021. <https://idraulica.caleffi.com/rivista/61-gli-impianti-pompa-di-calore-aria-acqua>.
- [5] Idraulica 64 Caleffi. *Pompe di calore aria-acqua: efficienza e retrofit degli impianti*. La Terra Promessa Onlus - Novara. Pubblicazione registrata presso il Tribunale di Novara al n. 26/91 in data 28/9/91, 2023. <https://idraulica.caleffi.com/rivista/64-pompe-di-calore-aria-acqua-efficienza-e-retrofit-degli-impianti>.
- [6] DANDRI, Fabio. Glossario del bilancio termico dell'edificio. *La casa passiva: principi e comfort*, 2019. Agenzia per l'energia del Friuli Venezia Giulia.
- [7] KULL, Tuule Mall; SIMSON, Raimo; THALFELDT, Martin; KURNITSKI, Jarek. Influence of time constants on low energy buildings' heating control. *Energy Procedia*, Volume 132, 2017, ISSN 1876-6102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.640>.
- [8] Decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102. Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Serie Generale n. 165, 18 luglio 2014.

- [9] MILOTTI, Edoardo. Filtri. *Corso di Fondamenti Fisici di Tecnologia Moderna*, 2019. Disponibile online: <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:aa26ca40-aef4-4414-b3de-eca795f662f8>.
- [10] MUSSI, Gaia. Il ruolo della termoregolazione. *Infobuildenergia* <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/riscaldamento-termoregolazione-valvole-risparmio-energetico/>.
- [11] Albatros - Heat pump controller, *Siemens Switzerland Ltd.*. Edition 1.4, 2021.
- [12] MISTRETTA, Marina. Regime transitorio termico. *Università degli studi mediterranea di Reggio Calabria*, 2011. Disponibile online: https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2011_289_11765.pdf.
- [13] *Classificazione dei sistemi di controllo*. Slide PDF, disponibile online: https://moodle.calvino.ge.it/pluginfile.php/7489/mod_resource/content/1/Sistemi%20di%20controllo.pdf.
- [14] Controllori PID. *Università degli studi di Ferrara*. Slide PDF, disponibile online: https://www.unife.it/ing/lm.meccanica/insegnamenti/dinamica-controllo-diagnosi-di-sistemi-b/materiale-didattico/Controllori_PID.pdf.
- [15] Sistemi di termoregolazione degli impianti termici, *BibLus di ACCA software S.p.A*, 2023. <https://biblus.acca.it/termoregolazione-impianti-termici/>.
- [16] Impianto termico e sistema di distribuzione, *BibLus di ACCA software S.p.A*, 2022. <https://biblus.acca.it/impianto-termico-e-sistema-di-distribuzione-tutto-quello-che-devi-sapere/>.
- [17] Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. *Ministero dello sviluppo economico*, 2015. https://www.mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_requisiti_minimi.pdf.
- [18] D. Palladino, F. Pagliaro, V. Del Fatto, C. Lavinia, F. Margiotta, L. Colasuonno. Stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale e analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE), 2019. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:17117d4c-6f72-47ec-8853-ead6db3476eb>
- [19] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). *UNI EN ISO 6946:2017 - Prestazioni termiche degli edifici. Calcolo della trasmittanza termica dei componenti edilizi*, 2017. <https://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-6946-2017>
- [20] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). *UNI 10348: Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto*, 2008. <https://conto.uni.com/uni-en-15316-1-2008>

- [21] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). *UNI EN 15316-1: Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo delle richieste di energia e delle efficienze del sistema - Parte 1: Generalità ed espressione della prestazione energetica, Moduli M3-1, M3-4, M3-9, M8-1, M8-4*, 2018. <https://store.uni.com/uni-en-15316-1-2018>
- [22] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). *UNI/TS 11300-2: Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali*, 2019. <https://store.uni.com/uni-ts-11300-2-2019>
- [23] Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*. 2005. https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/2005_0192.htm
- [24] Decreto Legislativo 10 giugno 2020, n. 48. *Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*, 2020. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/06/10/20G00066/sg>
- [25] Inerzia termica negli edifici, *A3R Studio Architettura* <https://www.a3rarchitettura.it/a3r-inerzia-termica-muri>.