Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Simulatore di reti di edifici per la messa a punto di strategie di controllo. Applicazione e validazione sperimentale su una rete di edifici

G.Comodi, A.Fonti, A.Giantomassi, F.Polonara, S.Longhi

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Report RdS/2013/120

SVILUPPO DI UN APPROCCIO PER LA GESTIONE OTTIMALE DI EDIFICI: APPLICAZIONE SU UN CASO PILOTA

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012
Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica
Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi
Obiettivo: Gestione ottimale delle reti di edifici

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sviluppo di un simulatore per la gestione ottimale di reti di edifici : applicazione su un caso pilota"*.

Responsabile scientifico ENEA: Dr. Stefano Pizzuti

Responsabile scientifico Università Politecnica delle Marche: prof. Gabriele Comodi.

Gli autori desiderano ringraziare Carlo Vitali e Luca Servasi che hanno partecipato al progetto durante il loro lavoro di tesi di laurea.

Indice

SOMMARIO 3

2 INTRODUZIONE 4

3 IL SOFTWARE HAMBASE 6

3.1 IL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE PER LA GENERAZIONE DEI DATI: IL SOFTWARE DI SIMULAZIONE HAMBASE 6
3.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO HAMBASE 8
3.3 INGRESSO DATI STANDARD 9
3.4 INGRESSO DATI EXTRA 10
3.5 INGRESSO DATI RIGUARDANTI L'EDIFICIO 10
3.6 COMANDI ACCESSORI 13

4 LA MODELLAZIONE DELL'EDIFICIO E DELLA RETE DI EDIFICI 14

4.1 MODELLAZIONE MULTILIVELLO DELL'EDIFICIO F40 14
4.1.1 Modello 57 zone 14
4.1.2 Modello 15 zone 15
4.1.3 Modello Monozona 16
4.2 LA MODELLAZIONE MULTILIVELLO DEL CLUSTER DI EDIFICI 16
4.3 LA STRUTTURA SIMULINK DEL SIMULATORE 18
4.3.1 Il modello del Simulatore per un edificio non termostatato 19
4.3.2 Il subsystem della Centrale Termica 20
4.3.3 Il subsystem del Fancoil 20
4.3.4 Il subsystem dell'HAMbase 21
4.3.5 Il subsystem del collettore di ritorno 22
4.3.6 Il modello del Simulatore per un edificio termostatato con controllo dei consumi 23
4.3.7 Il subsystem del Centrale Termica con funzione switch 23
4.3.8 Il subsystem del Distributore 25
4.3.9 Il subsystem del Termostato 26
4.3.10 Il subsystem dei Contatori Energetici 27
4.4 RIEPILOGO POSSIBILI OUTPUT DEL SIMULATORE DELL'EDIFICIO 27
4.5 IL MODELLO DEL SIMULATORE PER UNA RETE DI EDIFICI 29
4.5.1 I subsystem degli edifici 31
4.5.2 I subsystem dei termostati 32
4.5.3 I subsystem dei distributori del fluido termovettore con modellazione di valvole a 3 vie 32
4.5.4 Il subsystem del collettore del fluido vettore di alto livello 33
4.5.5 Il subsystem della centrale termica con contatori energetici integrati 34
4.5.6 Il subsystem del generatore di segnali di controllo 35

5 RISULTATI 37

5.1 RISULTATI SIMULAZIONI PER L'EDIFICIO A 15 ZONE 38
5.1.1 Simulazioni Ancona 60 giorni invernali free running 38
5.1.2 Simulazioni Ancona 60 giorni invernali termostato 39
5.1.4 Simulazioni Ancona 60 giorni estivi free running 43
5.1.5 Simulazioni Ancona 60 giorni estivi termostato 44
5.1.6 Simulazioni Roma 60 giorni invernali free running 47
5.1.7 Simulazioni Roma 60 giorni invernali termostato 48
5.1.8 Simulazioni Roma 60 giorni estivi free running 51
5.1.9 Simulazioni Roma 60 giorni estivi termostato 52

5.2 RISULTATI SIMULAZIONI PER L'EDIFICIO A 57 ZONE 58
5.3 RISULTATI SIMULAZIONI PER IL CLUSTER DI EDIFICI 64
6 CONCLUSIONI 69
7 BIBLIOGRAFIA 70
8 APPENDICE 1: SINTESI DATI METEO 71
9 APPENDICE 2: CURRICULUM SCIENTIFICO DEGLI AUTORI 77
9.1 GABRIELE COMODI 77
9.2 ALESSANDRO FONTI 77
9.3 ANDREA GIANTOMASSI 77
9.4 FABIO POLONARA 77
9.5 SAURO LONGHI 78

Sommario

La presente relazione tecnica riporta una descrizione dell'attività svolta per lo sviluppo di un simulatore di consumi energetici di edifici e di reti di edifici. L'idea di base è quella del "cluster" di zone connesse tra loro da reti energetiche termiche ed elettriche. In questa ottica, l'edificio (in questo caso la palazzina F40 del C.R. ENEA- Casaccia) può essere visto come un cluster di stanze e il quartiere o la via possono essere visti come cluster di edifici (in questo caso la smart street e la microrete energetica a servizio degli edifici F66- F73 del C.R. ENEA- Casaccia). Lo sviluppo del simulatore si è concentrato particolarmente sulla simulazione dei consumi energetici per il riscaldamento e per la climatizzazione; infatti la simulazione degli altri carichi elettrici (illuminazione) è stata l'oggetto del PAR precedente. Il software è sviluppato in ambiente Matlab/Simulink; il cuore del programma è un software open source (HAMbase) che permette di simulare l'edificio. HAMbase tuttavia è solo un blocco di tutta la struttura sviluppata (che comprende centrale termica, ventilconvettori, collettori di mandata e di ritorno, valvole regolatrici…). Il software sviluppato è predisposto per poter sostituire sia i dati generati da HAMbase (temperatura interna, umidità relativa) sia i dati meteorologici, con dati reali provenienti da una centralina meteo e da reti di sensori installati nell'edificio. In particolare, per il PAR 2012 il software di simulazione sviluppato è stato applicato su tre modelli: un modello dell'edificio F40 a 57 zone; un modello dell'edificio F40 a 15 zone; un modello di cluster di edifici della smart street ENEA (edifici F66-F73). Per ciascun modello, sono state svolte simulazioni per due località (Ancona e Roma), in differenti stagioni (estate ed inverno), in modalità free-running e con regolazione mediante termostato.
Il simulatore permette di modellare controlli per ciascuna unità minima modellata (zona). I principali controlli modellati sono quelli implementati realmente sulla palazzina F40 reale, vale a dire: i) controllo sull'accensione/spegnimento, regolazione della velocità dei singoli ventilconvettori; ii) temperatura di set-point in ogni ambiente; iii) differenti temperature di mandata dalla centrale termica (non attuabile per nell'F40).
Il simulatore del cluster di edifici permette un grado di libertà in più nella regolazione della potenza fornita ai singoli edifici e alle singole zone di questi; a monte di ogni edificio è stata infatti modellata una valvola a tre vie che regola la portata di fluido termovettore che può essere inviata ad ogni stabile.
Lo strumento sviluppato dimostra di essere molto potente e flessibile in quanto permette di simulare sia variabili ambientali interne all'edificio sia variabili energetiche nonché, potenzialmente, sistemi complessi di edifici (o reti di edifici, reti di teleriscaldamento) anche accoppiati a sistemi di generazione distribuita.
In particolare, le variabili ambientali interne ed energetiche simulate potranno essere utilizzate per definire indici di comfort(ad esempio: PMV - Predicted Mean Vote, Voto medio previsto; PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied, Percentuale di insoddisfatti) e di consumo ($kWh/m^3_{condizionato}$; kWh/addetto) che potranno essere elaborati attraverso funzioni di ottimizzazione (fitness approximation) per la definizione di strategie ottimali di logiche di controllo per la massimizzazione del risparmio energetico.
Queste strategie ottimali di controllo possono essere testate ed eseguite sul simulatore stesso in una ottica di miglioramento continuo.

2 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 4 Marzo 2013 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il finanziamento delle attività di ricerca affidate all'ENEA all'interno del Piano Triennale della Ricerca nell'ambito del Sistema Elettrico nazionale 2012-2014, approvato con il DM del 9 novembre 2012.
La presente relazione tecnica dal titolo "Sviluppo di un approccio per la gestione ottimale di edifici: applicazione su un caso pilota" è il frutto dell'accordo di collaborazione stipulato tra l'ENEA ed il "Dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche" (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche e fa parte del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2012. In particolare, le attività dell'accordo tra ENEA e DIISM oggetto della presente relazione tecnica si inseriscono nell'ambito del Progetto C1 "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi" e si riferisce alla prima annualità del Piano Triennale 2012-2014.

L'attività si inserisce in un contesto di collaborazione iniziato tra ENEA e DIISM già con lo scorso Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale frutto dell'Accordo di Programma stipulato in data 2 agosto 2010 tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA.
Nel PAR 2010 venne sviluppata una metodologia per la supervisione remota di edifici residenziali equipaggiati con piattaforma domotica :
(http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-332.pdf).
Nel PAR 2011 venne sviluppato un approccio per la gestione ottimale di edifici applicato sullo smart village C.R. Casaccia (http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/illuminazione-pubblica/2011/054-rds-pdf)

L'attività oggetto di questa relazione tecnica ha avuto l'obiettivo di sviluppare un simulatore di edifici e di cluster di edifici. L'idea di base è quella del "cluster" di zone connesse tra loro da reti energetiche termiche ed elettriche. In questa ottica, l'edificio (in questo caso la palazzina F40 del C.R. ENEA- Casaccia) non è altro che un cluster di stanze e il quartiere o la via non è altro che un cluster di edifici (in questo caso la smart street e la microrete energetica a servizio degli edifici F66- F73 del C.R. ENEA- Casaccia). Il simulatore sviluppato ha come duplice obiettivo quello della modularità e della flessibilità. Esso può, infatti, simulare potenzialmente appartamenti, edifici, quartieri (modularità), impianti di generazione distribuita e strategie di active demand side management delle utenze termiche ed elettriche (flessibilità). In particolare nel PAR 2012, l'attività si è concentrata sulla simulazione della domanda termica, in quanto la simulazione della domanda elettrica (in particolare l'illuminazione) è stata oggetto del PAR precedente.
La finalità del software sviluppato è quella di permettere di simulare strategie di risparmio energetico e logiche di controllo avendo come output della simulazione stessa:

i) parametri ambientali interni (temperatura interna, umidità relativa) che identificano il comfort ambientale;
ii) parametri aggregati (consumi di elettricità e di gas naturale, sia istantaneo che annuo) che identificano la spesa energetica.

Questi parametri opportunamente elaborati permetteranno di individuare indici per la valutazione sia della sensazione termica nelle varie zone dell'edificio (ad esempio: PMV -

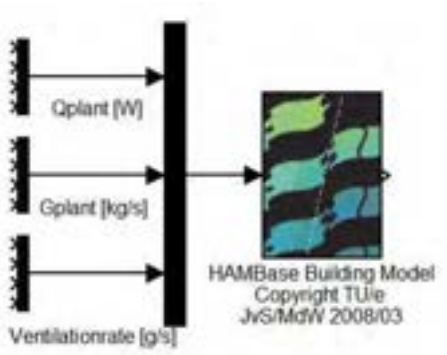
Predicted Mean Vote, Voto medio previsto; PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied, Percentuale di insoddisfatti) e sia dei consumi e dei costi energetici (consumo di gas naturale o elettricità per metro cubo condizionato; spesa energetica per metro cubo condizionato o per addetto). Questi indici verranno poi elaborati attraverso funzioni di ottimizzazione (fitness approximation) per la definizione di strategie ottimali di logiche di controllo per la massimizzazione del risparmio energetico.

La relazione tecnica è così strutturata: dopo la presente introduzione, nel capitolo 3 viene descritto il software open source di simulazione Hambase, utilizzato per simulare la dinamica dell'edificio; nel capitolo 4 viene descritta la modellazione dell'edificio e del cluster di edifici fatta in ambiente Matlab/Simulink: in particolare vengono descritti in dettaglio tutti i sottosistemi sviluppati per simulare il comportamento dinamico dell'edificio e della impiantistica, dalla centrale termica/frigorifera ai singoli ventilconvettori; nel capitolo 5 vengono presentati i principali risultati delle simulazioni svolte; nel capitolo 6 vengono riportate le principali conclusioni. Dopo la bibliografia (capitolo 7), le due appendici riportano una sintesi dei dati meteo per le località simulate (capitolo 8) e il curriculum vitae degli estensori della presente relazione (capitolo 9).

3 Il software HAMbase

3.1 *Il programma di simulazione per la generazione dei dati: il software di simulazione HAMBASE*

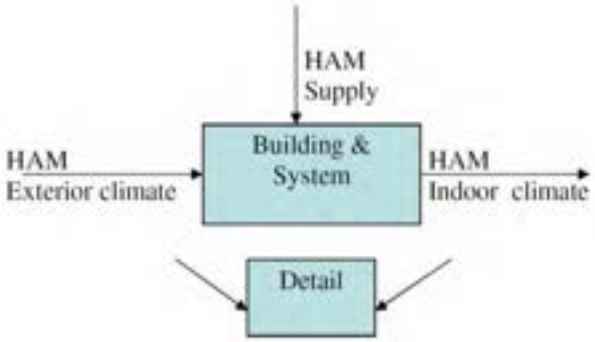
Il software HAMbase permette di analizzare e simulare il comportamento di un edificio sfruttando il modello della temperatura interna, l'umidità dell'aria interna e il consumo di energia che occorre per il riscaldamento e il raffreddamento di un edificio multizona.
L'acronimo HAMbase sta per Heat Air and Moisture balance ovvero indica i tre parametri principali del grado di benessere termico di un edificio. Il programma è stato sviluppato dai ricercatori dell'Università di Eindhoven, è open source e lavora in ambiente di programmazione MatLab/Simulink.
L'HAMbase utilizza MatLab per implementare le equazioni differenziali ordinarie (ODEs) e/o parziali (PDEs) che descrivono lo scambio termico tra un edificio e l'ambiente esterno.
La scelta dell'ambiente MatLab ha reso possibile sviluppare modelli geometrici e termici complessi utilizzando una sintassi di scrittura molto chiara e trasparente così da permettere ad programmatori di entrare all'interno del linguaggio macchina ed effettuare le modifiche necessarie per la simulazione desiderata.
Quando dobbiamo poi utilizzare nello stesso edificio più impianti HVAC (acronimo inglese che indica: riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) il cui comportamento per essere simulato ha bisogno dell'implementazione di più equazioni differenziali, è necessario procedere inserendo le geometrie dell'edificio sotto forma di matrici ed il MatLab è lo strumento più idoneo per manipolare ed elaborare matrici di grandi dimensioni.



Rappresentazione del modello del simulatore HAMBASE

Con il software HAMbase possiamo quindi sviluppare modelli sottoposti a differenti fenomeni di scambio termico con una accuratezza più o meno elevata.
Si può modellare la geometria di un edificio dotato di più impianti termici e simulare lo scambio termico fra sistema e ambiente esterno decidendo la durata della simulazione e il periodo dell'anno in cui studiarla.
Per la realizzazione di sistemi di termoregolazione, l'approccio della simulazione oraria, comune a molti software, non è tuttavia adeguata nel caso in cui si voglia integrare la dinamica dei sistemi HVAC con la loro relativamente piccola costante di tempo. Pertanto, per risolvere il problema si è realizzato in HAMbase un modello ibrido costituito da una componente con

passo temporale variabile ed una a passo discreto di un'ora. Tale modello appena descritto viene visualizzato in Matlab/Simulink sotto forma di S-Function (una S-Function è una descrizione, mediante linguaggio di programmazione, di un sistema dinamico, il cui codice può essere scritto utilizzando i linguaggi Matlab o C). L'ambiente Simulink, in fase di running, esegue ripetute chiamate durante specifici stadi della simulazione alle routine del modello HAMbase.



Architettura dell'HAMbase

I principali parametri da impostare in HAMbase sono:

- dati meteorologici;
- localizzazione geografica (latitudine, longitudine, altezza dal sul livello del mare);
- numero di zone in cui è suddiviso l'edificio e le loro caratteristiche costitutive;
- caratteristiche costruttive delle componenti interne all'edificio;
- fenomeni di ombreggiamento;
- descrizione dettagliata delle superfici che costituiscono ogni zona;
- presenza di finestre;
- arredamento;

Per quanto riguarda i parametri forniti in input richiesti dal simulatore troviamo;

- potenza [W];
- vapore [Kg/s];
- ventilation rate [g/s];

I parametri forniti in output dal sistema sono invece;

- temperatura [C];
- umidità relativa [%];
- temperatura media radiante delle pareti [°C].

Nel modello preso in considerazione l'unità fondamentale dell'edificio è la zona. Una zona può essere una stanza ma anche un numero di locali adiacenti soggetti alle stesse condizioni climatiche. Il modello globale di una zona è costituito da due parti: un modello termico ed un modello igrometrico. Nel modello termico lo stato interno viene rappresentato da una temperatura globale per l'intera zona e da alcune temperatura radianti che sono dovute alle superfici interne. Il calcolo dettagliato dello scambio per radiazione tra le superfici contribuisce

in maniera importante all'accuratezza del modello nel caso in cui si prendano in considerazione: superfici radianti costituiti essenzialmente da corpi grigi; superfici a temperatura uniforme; assenza totale di stratificazione. La trattazione del modello igrometrico è pressoché simile a quella del modello termico, tuttavia in questo specifico caso le equazioni che regolano il modello hanno tali caratteristiche costitutive: non linearità; presenza di due potenziali: umidità assoluta e relativa. Per semplificazione le equazioni sono state linearizzate anche se questo comporta una minore validità del modello. Tuttavia si è scelta una soglia di umidità che varia dal 20%-80% valori ritenuti di difficile raggiungimento nelle più comuni condizioni di vita quotidiana. I fattori presenti nel simulatore HAMBASE inerenti gli scambi termici che si presentano nelle casistiche di simulazione vengono così approssimati:

- i fattori di affacciamento sono approssimati con i (corretti) valori di integrazione sferica (la radiazione termica è ugualmente distribuita sulle pareti).
- Negli edifici isolati le temperature interne di superficie delle pareti opache sono circa uguali a quelle delle vetrate; quindi lo scambio per radiazione tra le pareti è piccolo.
- Dall'approssimazione dell'integrazione sferica è possibile ottenere una temperatura radiante per tutte le pareti e non ci sono restrizioni sulla forma geometrica del locale;
- l'aria di zona è perfettamente miscelata. Quindi una zona sarà caratterizzata da una temperatura d'aria uniforme;
- i coefficienti di superficie per la convezione e la radiazione sono costanti;
- tutto il calore radiante in ingresso è distribuito in modo uniforme sulle pareti ad eccezione delle finestre, che assorbono la stessa quantità di energia per unità di superficie.

3.2 Validazione del modello HAMbase

Il software HAMbase rappresenta il cuore del simulatore sviluppato in quanto generatore dei parametri fisici degli ambienti simulati. E' quindi lecito domandarsi se i risultati che si ottengono in output dopo la simulazione possano esser considerati attendibili o se necessitano di verifiche e controlli. I ricercatori che hanno sviluppato il software hanno trattato il problema dedicando una sezione del manuale (vedi bibliografia) ai tipi di test effettuati per la validazione dei risultati. In particolare, gli sviluppatori HAMbase hanno eseguito tre tipi di verifiche:

test di tipo comparativo
Utilizzando il database fornito dall'ente statunitense ASHRAE per confrontare i valori termodinamici catalogati per un dato edificio di geometria assegnata con i risultati ottenuti dall'elaborazione HAMbase.

test di tipo analitico
Sono stati applicati software solutori di equazioni differenziali (FEMLAB, FLEXPDE) applicandoli alle relazioni implementate in HAMbase e si sono confrontate le loro soluzioni con i valori di temperatura ed umidità in output dopo la simulazione.

test di tipo empirico
Gli stessi ricercatori dell'università di Eindhoven hanno effettuato delle misurazioni in due "test room" situate all'istituto di ricerche Fraunhofer Institute e, generando un livello di umidità controllata e una ventilazione controllata nelle due stanze, hanno monitorato gli andamenti della temperatura e dell'umidità relativa per 34 giorni.

L'andamento dei due parametri è stato successivamente confrontato con gli output generati dopo la simulazione in ambiente HAMbase. Nelle tre metodologie di confronto dei risultati emergono dei piccoli (ampiamente accettabili) scostamenti per l'umidità relativa e per la temperatura, errori che possono essere trascurati se il nostro scopo è quello di sviluppare un simulatore che lavori principalmente su lunghi periodi e finalizzato principalmente ad una analisi dei consumi energetici.

3.3 Ingresso dati standard

Nel software HAMbase ci sono due livelli di ingresso dei dati: livello standard e livello input extra. I due livelli sono funzione della complessità della simulazione che si vuole raggiungere, ora vediamo in dettaglio le variabili di ingresso da impostare.

1) Periodo

Il programma presenta di default un database delle temperature orarie registrate dalla stazione meteo del comune olandese di De Bilt per un intervallo di anni dal 1971 al 2010.
Dobbiamo allora scegliere come simulazione l'anno di partenza ed impostare il numero di giorni su cui si sviluppa il calcolo.

```
% BAS.Period=[yr, month,day,ndays]
  BAS.Period=[2009, 1,  1,   15];
```

2) Dati Meteo e Stazione

Se vogliamo prendere come riferimento meteo un'altra località diversa dal comune di De Bilt è necessario inserire nella current directory di Matlab un file meteo di estensione .dat specifico con il report orario delle temperature dal 1 Gennaio al 31 Dicembre con un massimo di 365 giorni (per gli anni bisestili l'ultimo giorno dell'anno viene simulato due volte).
Il file meteo inoltre deve contenere le seguenti informazioni orarie:

Irradiamento Solare [W/m2]
Copertura nuvolosa
Umidità Relativa Esterna
Velocità del vento [m/s]
Direzione del vento [gradi/nord]

Un file meteo contenente tutti i dati cercati per un anno "medio" può essere generato utilizzando il programma METEONORM (Appendice 1).

3) Ora Legale/Ora Solare

L'aspetto dell'ora legale che inizia la prima domenica di Marzo e termina l'ultima domenica di Ottobre può essere tenuto in considerazione digitando la stringa di comando BAS.DSTime = 1 oppure escluso digitando la stringa BAS.DSTime = 0.

3.4 Ingresso dati extra

Volendo aumentare il livello di precisione del modello simulato possiamo utilizzare comandi extra in ingresso che caratterizzano maggiormente lo scambio termico che avviene fra le zone e fra l'ambiente esterno e l'edificio. I comandi sotto elencati hanno assegnato un valore di default che possiamo modificare a seconda delle nostre esigenze.

Pre-condizionamento termico

Prima di iniziare la simulazione l'elaboratore risolve le equazioni di bilancio termico e si determina i parametri previsti (Ta, Rh) per un numero di 3 giorni extra in maniera tale da compensare la mancata valutazione dell'inerzia termica dell'edificio (soprattutto in inverno). Se si sta studiando un edificio dalla struttura pesante è bene aumentare il numero di giorni extra di pre-condizionamento.

Ombreggiamento

Su ogni finestra dell'edificio può insistere un'area di ombreggiamento dovuta alla presenza di un ostacolo esterno. Se vogliamo trascurare o considerare questo effetto di bordo dobbiamo inserire il comando: BAS.shadow=0 o BAS.shadow=1.
L'ombreggiamento sulle pareti dell'edificio è invece previsto da altri comandi devono essere programmati nella fase di definizione dell'edificio.

Mobilio

I locali sono normalmente ammobiliati e la presenza di elementi di arredo influenza l'accumulo di umidità ed essi stessi intercettano una frazione di irraggiamento solare riflettendola nella stanza. Se vogliamo evitare di calcolare questi effetti possiamo utilizzare la stringa: BAS.furnish=0 oppure se desideriamo considerarli BAS.furnish=1.

Flussi d'aria fra zone

Se i flussi d'aria sono gestiti da un sistema HVAC di ventilazione meccanica e possiamo quantificare il grado di ricambio d'aria dobbiamo inserire il comando BAS.Interzonal=1.
Se al contrario tele parametro non è conosciuto si digita la stringa BAS.Interzonal=0.

3.5 Ingresso dati riguardanti l'edificio

Il software HAMbase sviluppa la simulazione termodinamica di scambio termico su un modello di dati che il programmatore definisce: tale modello prende il nome di variabile ".BAS".
All'interno della variabile sono presenti tutte le stringhe di comando che caratterizzano l'edificio, la sua geometria, i materiali da costruzione scelti per le pareti esterne, interne, solai e cosi via. Il modello dell'edificio deve essere definito sotto i seguenti aspetti:

1) Numero di Zone e Volumi

Si devono definire il numero di zone microclimatiche in cui è stato suddiviso l'edificio e la loro dimensione in m^3.

```
% FORMAT BAS.Vol{zoneNo}=volume (m3);
BAS.Vol{1}= 145.8;
BAS.Vol{2}=110.8;
BAS.Vol{3}= 58.4;
```

2) Materiali da Costruzione

Si deve definire una lista di materiali utilizzati nell'edificio scegliendoli dal database "matprof" contenuto nel software. Ogni materiale è caratterizzato da un vettore di dati, ogni dato corrisponde ad una particolare caratteristica fisica utile nel calcolo dello scambio termico.

matprop = [spess, cond. term., densità capacità term., emissività, fattore resistenza diffusione, capacità di vapore*10^7]

Per ogni materiale si ha un identificativo e si sfruttano i vari identificativi per definire materiali compositi costituiti da più materiali di vario spessore accoppiati fra loro.

```
%BAS.Con{conID}=[Ri,    d1,    matID, dn,   matID,  Re,   ab,   eps].
 BAS.Con{1}       =[0.13,  0.214,   235,   0.120  ,409,     0.050,  003,
0.100,234,  0.04,0.9,0.9];
```

dove:

Ri = resistenza termica interna

d1 = spessore del primo materiale

matID = identificativo del materiale (da database)

dn = spessore del secondo materiale

Re = resistenza termica superficiale sul lato opposto

ab = coefficiente di assorbimento radiazione solare

eps = emissività esterna

3) Tipologia di superficie vetrata utilizzata

Si deve caratterizzare dal punto di vista termico anche la tipologia di vetrata impiegata per le finestre. Una finestra a vetro doppio con intercapedine avrà un coefficiente di resistenza termica maggiore rispetto alla finestra a vetro singolo. La presenza del tendaggio sarà anche essa importante nel calcolo finale dello scambio termico. Anche per le vetrate è presente un piccolo database che caratterizza le tipologie di "glazing system" più utilizzati.

```
%BAS.Glas{glaID}=   [Uglas, CFr,   ZTA,      ZTAw,    CFrw,    Uglasw]
BAS.Glas{1}     =   [1.309, 0.047, 0.308,    0.072,  0.116,  1.253  ];
```

dove:

Uglas = coefficiente di scambio termico senza tendaggio [W/K m2]

CFr = fattore convettivo senza tendaggio

ZTA = fattore di guadagno solare senza tendaggio

ZTAw= fattore di guadagno solare con tendaggio

CFrw= fattore convettivo con tendaggio

Uglasw = coefficiente di scambio termico con tendaggio [W/K m2]

4) Orientamento delle Pareti

La disposizione dei muri esterni rispetto ai punti cardinali e la loro inclinazione rispetto al terreno è fondamentale per determinare la quantità di energia termica ricevuta dal sole durante la giornata.

I comandi di riferimento sono i seguenti:

```
% FORMAT  BAS.Or{orID} = [tilt, azimuth];
% Tilt:     vertical     = 90, horizontal = 0;
% Azimuth: east  = -90, west = 90, south = 0, north = 180
%
%BAS.Or{orID}=[tilt,    azimuth];
BAS.Or{1}= [90.0,       135.0   ];
BAS.Or{2}= [90.0,       -45.0   ];
BAS.Or{3}= [45.0,       135.0   ];
BAS.Or{4}= [90.0,       0.0 ];      % south wall
BAS.Or{5}= [0.0,        0.0 ];      % horizontal roof
```

5) Componenti dell'edificio

Si può considerare un edificio come un insieme componenti costruttivi assemblati fra di loro, possiamo dividerli in cinque categorie:

5.1) Pareti esterne

Si deve definire la zona protetta da muro, la superficie, il materiale da costruzione utilizzato e il fattore di ponte termico (perdita di calore W/K) se presente.

```
%BAS.wallex{exID}=  [zoneNo,  surf,  conID,    orID,   bridge]
BAS.wallex{1}  =     [1,      27.0,    1,        4,     0 ];
```

5.2) Finestre nelle pareti esterne

Ogni muro esterno presenta una o più finestre e vanno definite indicando il muro di appartenenza, la superficie, la tipologia di vetrata scelta e il fattore di ombreggiamento (se presente).

```
%BAS.window{winID}= [exID, surf, glaID,   shaID]
BAS.window{1}    = [1,      8,    1,        0];
```

5.3) Muri a temperatura costante

Generalmente il pavimento dell'edificio adiacente al suolo può essere considerato a temperatura costante, questi muri vengono definiti dal comando:

```
%BAS.walli0{i0ID}=  [zoneNo, surf,   conID,  temp,    bridge]
BAS.walli0{1} =     [1,     20.5,   7,      10.0,        0];
```

5.4) Pareti Adiabatiche

Se l'edificio presenta delle pareti isolate termicamente tali da poter essere considerate adiabatiche, il software permette di definirle con la stringa:

```
%BAS.wallia{iaID}=  [zoneNo, surf, conID]
BAS.wallia{1} =    [1,      23.0,  2   ];
```

5.5) Muri Interni

I muri interni che dividono le varie zone dell'edificio devono essere definiti indicando i numeri delle due zone separate da quel muro interno, la superficie del muro e il materiale da costruzione. I solai fra un piano e l'altro sono considerati anche essi muri interni.

```
%BAS.wallin{inID}=  [zoneNo1,zoneNo2,   surf,     conID]
 BAS.wallin{1} =      [1,         2,         7,        4    ];
```

3.6 Comandi Accessori

1) Terminale di riscaldamento e raffreddamento

E' possibile inserire il valore della massima potenza termica dell'impianto (W); se il valore è sconosciuto bisogna inserire -1 che implica potenza infinita.

La potenza termica dell'impianto di raffreddamento è sempre richiesta, se non dovesse esistere tale impianto inserire il valore 0. Le potenze di raffreddamento e deumidificazione sono nulle. Per ogni zona quindi:

```
BAS.Plant{zoneNo}=[heating capacity [W], cooling capacity
[W],humidification capacity [kg/s],dehumidification capacity [kg/s]];
BAS.Plant{1}=[-1,0,0.00,-100.00];
```

2) Fattori correttivi per lo scambio termico convettivo

Il programma di simulazione diversifica il calore scambiato per via convettiva da quello radiante. Si hanno tre coefficienti:

CFh Fattore correttivo per l'impianto di riscaldamento:
- termoconvettori CFh =1
- radiatori CFh= 0.8
- risc. pavimento CFh = 0.5

CFset Fattore correttivo del valore di controllo
- temperatura dell'aria CFset =1
- temperatura comfort CFset = 0.6

CFint Fattore correttivo del guadagno termico saltuario
- generalmente CFint = 0.5

3) Recupero di Calore

Se viene utilizzato un impianto a recupero di calore occorre definire le due temperature limite di recupero per il riscaldamento Twws e per il raffrescamento Twwc.

Bisogna indicare efficienza dello scambiatore di calore etaww e le unità su cui agisce, vediamo quindi la stringa di comando:

```
% FORMAT BAS.heatexch{zoneNo}=[etaww, Twws, Twwc, HRUNo];
BAS.heatexch{1}=[0 22 40 1];
```

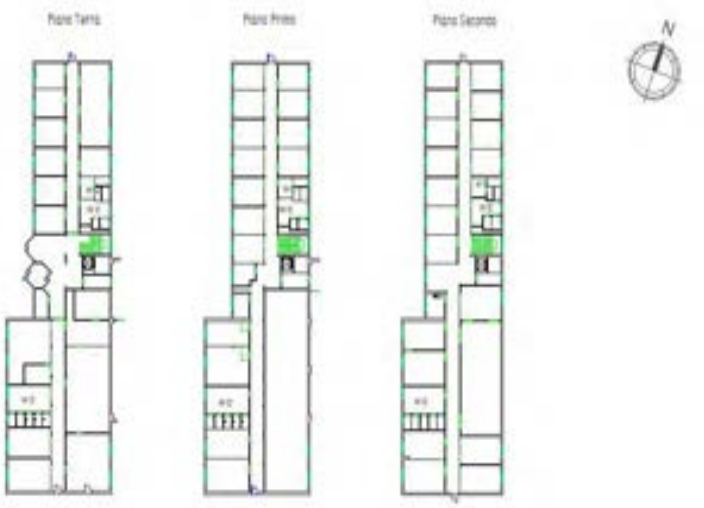
4 La modellazione dell'edificio e della rete di edifici

4.1 Modellazione multilivello dell'edificio F40

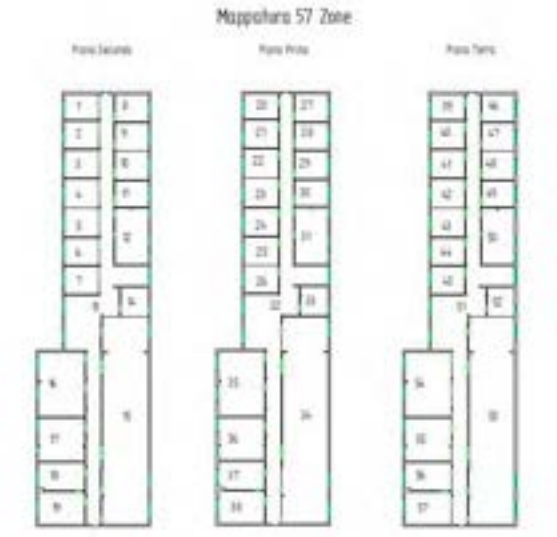
L'edificio F40 del centro di ricerche Casaccia è uno stabile di tre piani, la pianta ha una struttura ad "L" ed è orientato 15˚ direzione Nord Ovest.
All'interno della struttura si trovano gli uffici dei ricercatori, i laboratori, una sala conferenza, i servizi igienici, un corridoio centrale per piano ed i locali tecnici dedicati al controllo degli impianti. I locali dello stabile hanno una metratura differente, il che comporta un diverso valore di volume d'aria da scaldare o da deumidificare qualora sia presente un termoconvettore. La programmazione della variabile BAS (quella che ne caratterizza la struttura) dell'edificio F40 può essere impostata secondo diversi livelli di accuratezza e caratterizzazione in funzione del numero di zone microclimatiche che si vanno ad inserire. E' quindi possibile pensare ad ogni stanza come una zona microclimatica da controllare e simulare in base alla potenza del terminale o dei terminali di impianto termico installati ed in base al profilo di utenza scelto per quella zona. Se si decide assegnare ad ogni stanza del fabbricato una zona microclimatica, il numero di stringhe di codice aumenterà notevolmente, perché si dovranno inserire per ogni zona tutti i comandi relativi ai muri interni, alle porte, al mobilio e ai profili termici. Risulta chiaro che l'elaboratore impiegherà più tempo nel risolvere le equazioni di bilancio termoigrometrico per un modello multizona piuttosto che per un modello a singola zona. Sarà quindi compito del programmatore scegliere il giusto compromesso fra livello di caratterizzazione dello stabile e velocità di processamento dei dati. Sono stati sviluppati tre differenti file BAS del centro ricerche con un differente livello di dettaglio.

4.1.1 Modello 57 zone

Nella parte nord e sud dell'edificio si possono distinguere due corridoi verticali che immettono in un atrio centrale dove si trovano le scale di comunicazione fra i piani. Se si vanno ad analizzare nel dettaglio i locali è possibile vedere dall'ingrandimento della pianta che ogni stanza deve essere caratterizzata dalla sua dimensione, dall'orientamento, dalla finestra esterna, dalla porta di accesso e in particolar modo dal terminale dell'impianto termico. Tuttavia, per non assegnare ad ogni locale una zona microclimatica, si dovranno fare delle approssimazioni, come considerare i due corridoi e l'atrio centrale come una unico volume, oppure accorpare più locali non riscaldati adiacenti fra loro. Procedendo con questo schema di ragionamento lo stabile F40 è stato suddiviso in 19 zone per piano, andando a creare un file di configurazione BAS di 57 volumi. Le figure nella pagina seguente mostrano le piante reali dei tre piani dell'F40 (figura in alto), e le 19 zone microclimatiche di ciascun piano inserite nel modello. Il numero indicato nella mappa è lo stesso identificativo utilizzato nello script di calcolo del modello per distinguere le zone.



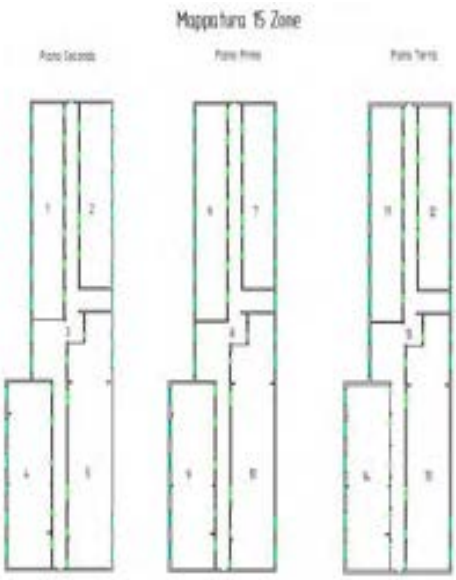
Pianta reale dei tre piani dell'F40



Mappatura 57 zone dell'F40

4.1.2 Modello 15 zone

Per alleggerire il carico di calcoli si è pensato ad una nuova suddivisione delle zone raggruppate secondo il criterio dell'orientamento dell'edificio. Il nuovo modello a 15 zone è contraddistinto da 5 zone climatiche per piano con i corridoi e gli atri centrali accorpati come nel caso precedente, mentre le restanti 4 zone divise seguendo la logica ala Nord-Est, ala Nord-Ovest, ala Sud-Est e ala Sud-Ovest. La nuova mappatura delle zone divise per piano e contraddistinte con il numero identificativo utilizzato nel codice di calcolo viene mostrata nella figura seguente.



Mappatura 15 zone dell'F40

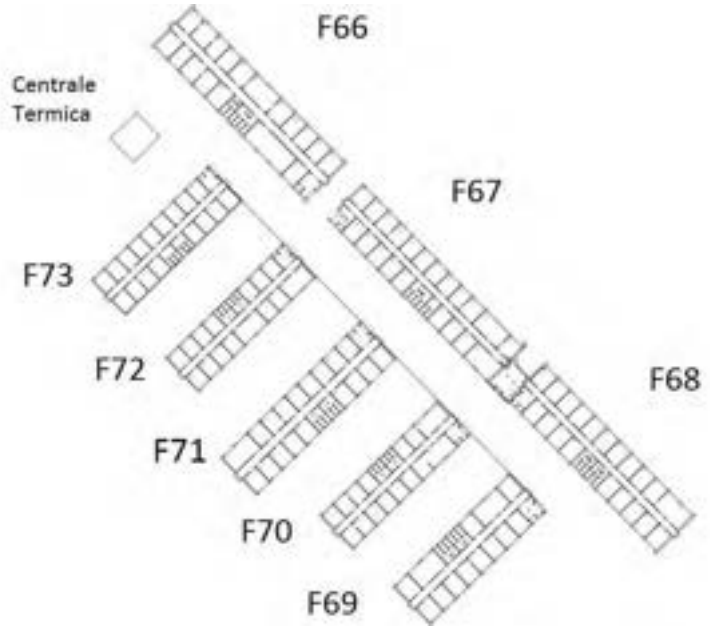
4.1.3 Modello Monozona

Scendendo di livello nella caratterizzazione del modello dell'edificio si arriva come ultimo stadio a considerare l'intero stabile di tre piani come un'unica zona microclimatica. Le finestre presenti sui due lati saranno modellate come due macro finestre disposte sul lato est e sul lato ovest, l'edificio non sarà suddiviso in tre piani e di conseguenza non saranno inserite tutte le stringhe di codice utili per definire i solai ed i muri interni. Alla fine si arriverà ad un modello semplificato definito dal punto di vista termoigrometrico con un singolo parametro per la temperatura e con un singolo parametro per l'umidità relativa. Questo esercizio è di fondamentale importanza nella prospettiva di arrivare a simulare cluster di edifici complessi, quali vie, reti di teleriscaldamento e quartieri di una smart city.

4.2 La modellazione multilivello del cluster di edifici

Come anticipato, la modellazione monozona descritta in precedenza potrebbe essere utilmente impiegata nella programmazione del simulatore per la gestione energetica di un gruppo di edifici (cluster di edifici) o, considerando "confini" ancora più ampi, per la descrizione di interi quartieri includendo nella definizione di "zona" anche tutto ciò che separa due o più edifici come strade, incroci, etc…

Se si desidera infatti simulare l'andamento dei consumi energetici di un distretto di edifici è necessario editare molteplici file BAS, i quali dovranno necessariamente avere un livello di dettaglio adeguato in modo tale da non far aumentare vertiginosamente il carico computazionale del software di simulazione. Con il termine "cluster" si intende indicare, in questa relazione, un insieme più o meno grande di edifici caratterizzati dal fatto di essere serviti dalla stessa rete di energia termica ed elettrica. Presso il Centro Ricerche Casaccia, oltre all'edificio altamente automatizzato F40, già menzionato, vi sono altri otto stabili (edifici dall'F66 all'F73) serviti da una centrale termica dedicata che insieme costituiscono il "cluster" sul quale sarà testato il simulatore di dati oggetto della presente ricerca. La disposizione dei locali che compongono il cluster teleriscaldato/raffreddato dalla medesima centrale termica è rappresentata nella figura seguente:

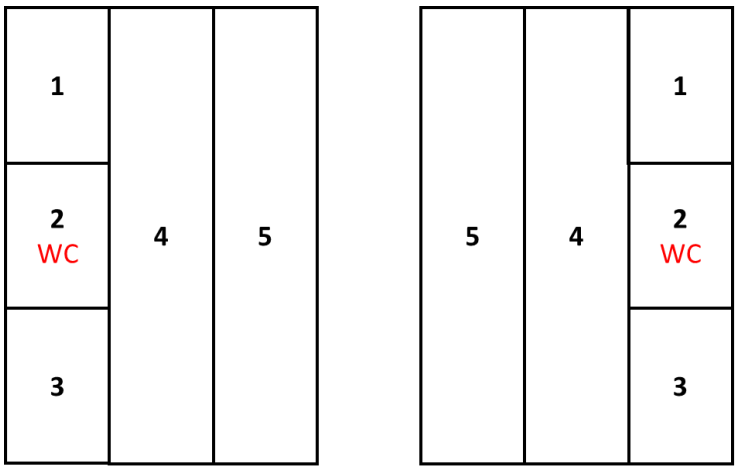


Pianta del Cluster di edifici

La tabella che segue fornisce invece indicazioni sulla struttura e sull'orientamento degli edifici. In particolare lo stabile F67 è l'unico ad avere una struttura a due piani, dei quali uno è interrato, mentre il piano terra è al livello degli altri fabbricati.

1	F66	disposti in linea, orientati
2	F67	direzione 45˚ gradi est con l'F67
3	F68	che presenta un piano interrato
4	F69	
5	F70	disposizione parallela
6	F71	orientati in direzione
7	F72	45˚ gradi ovest
8	F73	

Essendo il cluster composto da un numero contenuto di edifici si è deciso di non utilizzare una caratterizzazione monozona, ma di adottare una suddivisione a cinque zone per tutti gli edifici, eccetto lo stabile F67. Quest'ultimo è stato caratterizzato con cinque zone per il piano terra e con un monozona per il piano interrato. Complessivamente l'F67 ha quindi sei zone. La figura seguente mostra con più chiarezza la mappatura delle zone appena descritta.



Mappa F69, F70, F72 Mappa F66, F67, F68, F71, F73

Mappatura zone degli edifici del cluster

Il software Hambase, motore del simulatore, è stato implementato in Simulink mediante un'opportuna S-function. Il progetto iniziale del software da parte dei ricercatori di Eindhoven non prevedeva l'impiego di più istanze di Hambase nello stesso modello Simulink. Ciò era dovuto al fatto che la S-function base fa un pesante uso di variabili globali, le quali portano a seri problemi di sovrascrittura dei dati con più istanze. Per poter risolvere questo problema ed implementare il cluster di edifici, senza entrare troppo nei dettagli tecnici, la S-function base dell'Hambase è stata modificata eliminando tutte le variabile globali al posto delle quali il Simulink crea una variabile globale univoca, di tipo struttura, per ogni istanza. Facendo un esempio pratico, l'istanza di Hambase relativa all'edificio F66 in fase di inizializzazione del modello creerà una propria variabile globale contenente tutte le informazioni per la corretta esecuzione. Questi dati non potranno essere modificati dalle altre istanze di Hambase, a loro volta in esecuzione parallela, dato che possono memorizzare dati solo nelle proprie variabili globali.

4.3 La struttura Simulink del simulatore

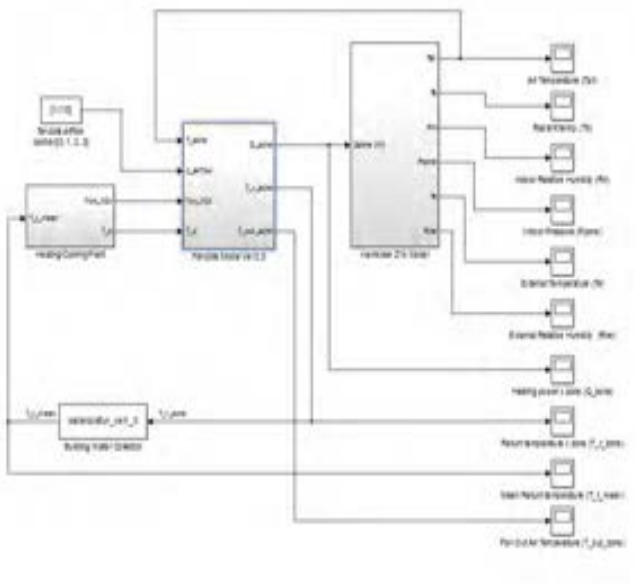
Nel momento in cui si è terminata la programmazione della variabile BAS occorre modellare l'impianto termico, i suoi componenti e la rete che va ad alimentare i diversi ventilconvettori presenti all'interno degli edifici. Il programma che comunica con il Matlab per la modellazione di sistemi dinamici è il software Simulink. Questo è un ambiente per la modellizzazione, l'analisi e la simulazione di sistemi dinamici, supporta la simulazione dei sistemi lineari e non lineari che operano con segnali continui o discreti di tipo tempo continuo o tempo discreto.
Il software fornisce una interfaccia grafica che consente di definire e di costruire il modello voluto mediante un diagramma a blocchi. Ogni blocco rappresenta una funzione di tipo fisico o matematico e all'interno di Simulink è possibile trovare una libreria di blocchi già precompilati che rispondono alle esigenze di programmazione più generiche. Tuttavia è possibile, per un utente esperto, programmare in linguaggio C++ un proprio sottosistema personalizzato che può essere definito come S-function. Per creare un modello Simulink si copiano i blocchetti (sottosistemi) necessari per creare il sistema di calcolo desiderato all'interno dell'area di lavoro, si connettono graficamente i singoli blocchi con archi orientati, si impostano i

parametri del simulatore (inizializzazione) e dopo aver mandato in running il sistema si analizzano gli output grafici o numerici ottenuti. Lo sviluppo del simulatore per la gestione energetica di un "cluster" di edifici è proceduto per gradi. Partendo dalla spiegazione del modello di simulatore termico di un singolo fabbricato senza controllo dei consumi e senza funzione termostato si arriverà alla descrizione di un modello dotato di termostato capace di quantificare il consumo di metano per il riscaldamento invernale ed il consumo elettrico per i condizionamento estivo. Nell'ultimo paragrafo sarà presentato invece il simulatore finale capace di quantificare l'andamento dei principali parametri termotecnici e la gestione energetica di una rete di otto edifici. Le differenti sezioni del capitolo descriveranno in maniera dettagliata i sottosistemi principali sviluppati, in quanto all'interno di ogni blocco sono state implementate le equazioni che descrivono il comportamento fisico del componente rappresentato.

4.3.1 Il modello del Simulatore per un edificio non termostatato

La figura in basso rappresenta il modello finale in Simulink dell'impianto termico e dei componenti utilizzati per simulare la dinamica termica degli impianti di riscaldamento e dei principali parametri termotecnici nell'edificio F40.
Il modello è costituito essenzialmente da quattro grandi sottosistemi che sono:

- Il subsystem della Centrale Termica
- Il subsystem del Fancoil
- Il subsystem HAMbase
- La S-function del collettore di ritorno



Modello del Simulatore non Termostatato

4.3.2 Il subsystem della Centrale Termica

La funzione che rappresenta il generatore di calore presenta due variabili di uscita e una variabile di ingresso:

INGRESSI

valore di ritorno della temperatura dell'acqua dal collettore T_r_mean	[°C]

USCITE

portata massica d'acqua uscita dal generatore di calore flow_h20	[kg/s]
temperatura di uscita del fluido vettore (acqua) T_d	[°C]

4.3.3 Il subsystem del Fancoil

Il subsystem che simula il comportamento del ventilconvettore è stato modellato tramite un sistema su cui agiscono 4 canali di ingresso e 3 canali di uscita che sono:

INGRESSI

valore di ritorno della temperatura ambiente T_zone	[°C]
portata in volume della ventola del fancoil c_airflow	[m^3/h]
portata massica d'acqua flow_h2o	[kg/s]
temperatura in ingresso del fluido vettore (acqua) T_d	[°C]

USCITE

potenza termica in ingresso per ogni zona Q_zone	[W]
temperatura radiante del fluido vettore del fancoil T_r_zone	[°C]
temperatura di uscita dell'aria dal ventilconvettore	[°C]

L'analisi di questo sottosistema richiede un approfondimento per chiarire quale legge fisica è stata implementata nella S-function per la simulazione del fancoil. Il metodo utilizzato per descrivere lo scambio termico all'interno del ventilconvettore è il metodo ε-NTU. L'aria ambiente viene prelevata dal ventilatore azionabile con varie velocità, passa attraverso il filtro dove si libera delle polveri grosse e viene spinta verso la batteria di scambio termico dove per convezione forzata scambia calore con l'acqua. Il coefficiente ε rappresenta il rendimento dello scambio termico che si realizza fra il fluido vettore e l'aria.
In caso di riscaldamento il calore viene prelevato dal fluido termovettore (acqua), in caso di raffreddamento viene ceduto ad esso. La relazione che si utilizza per determinare il calore fornito dal ventilconvettore è la seguente:

$$Q_{zone} = P_{f_c}(i) = \varepsilon n_{fc} \dot{m}_{air} Cp_{air} (T_d - T_{zone}(i))$$

Dove si ha che:

-P_{f_c} = Potenza termica all'istante i-esimo fornita dal fancoil nella zonz	[W]
-n_{fc} = Numero di fan coil presenti nella zona	
- $\dot{m}_{air}$= Portata massica d'aria relativa al livello di ventilazione scelto	[kg/s]
-Cp_{air} = Calore specifico a pressione costante dell'aria	[J/kg˚K]
-T_d = Temperatura di mandata dell'acqua al ventilconvettore	[˚C]
-T_{zone} = Temperatura dell'aria nella zona	[˚C]

Nel corso della simulazione la temperatura dell'aria all'interno dei locali aumenterà fino ad un valore di soglia stabilito nel termostato (se presente) mentre la potenza termica fornita P_{f_c} andrà attenuandosi. Andiamo allora a descrivere come si esprime il valore della temperatura dell'aria e dell'acqua di ritorno dai ventilconvettori e quale possa essere il loro andamento teorico nella simulazione che dobbiamo realizzare. La temperatura dell'aria dei locali dell'edificio deve essere implementata utilizzando la relazione:

$$T_{out_{zone}}(i) = T_{zone}(i) + \left(\frac{P_{f_c}(i)}{\varepsilon n_{fc} \dot{m}_{air} Cp_{air}}\right)$$

Dove si ha che:

-T_{out_zone} = Temperatura dell'aria all'istante i-esimo	[˚C]
- T_{zone} = Temperatura dell'aria di partenza	[˚C]
- P_{f_c} = Potenza termica fornita dal ventilconvettore nella zona	[W]
- n_{fc} = Numero di fancoil presenti nella zona considerata	[-]
- $\dot{m}_{air}$= Portata massica d'aria relativa al livello di ventilazione scelto	[kg/s]
- Cp_{air} = Calore specifico a pressione costante dell'aria	[J/kg˚K]

Durante l'elaborazione la temperatura dell'aria interna verrà attualizzata continuamente e si dovrà osservare nell'output grafico un andamento crescente fino la valore di soglia fissato nel termostato, qualora questo sia presente. Per la temperatura del fluido vettore di ritorno dai convettori invece si fa riferimento alla seguente equazione:

$$T_{r_{zone}}(i) = T_d - \frac{P_{f_c}(i)}{n_{fc} \dot{m}_{H2O} Cp_{H2O}}$$

Dove abbiamo che:

-T_{r_zone} = Temperatura dell'acqua di ritorno attualizzata	[˚C]
- T_d = Temperatura dell'acqua di mandata	[˚C]
- P_{f_c} = Potenza termica fornita dal fancoil nella zona	[W]
- n_{fc} = Numero di fan coil presenti nella zona	
- $\dot{m}_{H2O}$= Portata massica d'acqua circolante nel convettore	[kg/s]
- Cp_{H2O} = Calore specifico a pressione costante dell'acqua	[J/kg ˚K]

Durante la fase di simulazione la temperatura di ritorno dell'acqua sarà attualizzata costantemente e, come accade per l'aria, l'andamento sarà crescente con un valore limite superiore di temperatura che si raggiungerà quando verrà raggiunta la condizione di temperatura costante dell'aria nel termostato.

4.3.4 Il subsystem dell'HAMbase

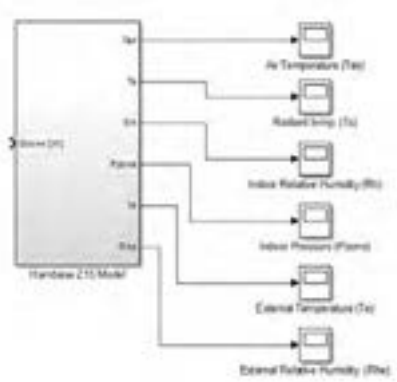
Questo sotto sistema riceve in ingresso la potenza termica fornita dai ventilconvettori in ogni zona assegnata ed esegue la compilazione delle operazioni di calcolo di scambio termo-igrometrico previste dal codice HAMbase, fornendo in uscita i parametri termotecnici cercati nella simulazione: temperatura dell'aria, valore dell'umidità relativa, pressione interna,

temperatura esterna e umidità relativa esterna. Vediamo nel dettaglio gli ingressi e le uscite del sottosistema studiato.

INGRESSI
potenza termica fornita dai fan coil nella zona Q_zone [W]

USCITE
temperatura indoor dell'aria nella zona di riferimento Tair [˚C]
temperatura radiante Ts [˚C]
umidità relativa indoor Rh [%]
pressione indoor Pzone [Pa]
temperatura esterna [˚C]
umidità relativa esterna Rhe [%]

Le uscite indicate terminano con un blocco di visualizzazione grafica "scope" grazie al quale è possibile visualizzare gli andamenti dei parametri termotecnici in funzione del tempo di simulazione impostato.



Input/output subsystem HAMbase

4.3.5 Il subsystem del collettore di ritorno

Nel blocco di simulazione per il collettore di ritorno dell'impianto di riscaldamento il fluido termovettore di ritorno dai terminali di impianto confluisce in un collettore dove si sommano tutti gli apporti termici dei flussi di ritorno alla temperatura T_r_zone e in uscita dal collettore si avrà un flusso principale ad una temperatura di uscita T_r_mean. Il subsystem presenta un canale di ingresso vettoriale con dimensione pari al numero di collettori ed un canale di uscita monodimensionale con la temperatura del flusso principale risultante. In dettaglio:

INGRESSI
valore di ritorno delle temperature dell'acqua dalle singole zone T_r_zone [˚C]

USCITE
valore risultante della temperatura di uscita dell'acqua T_r_mean [˚C]

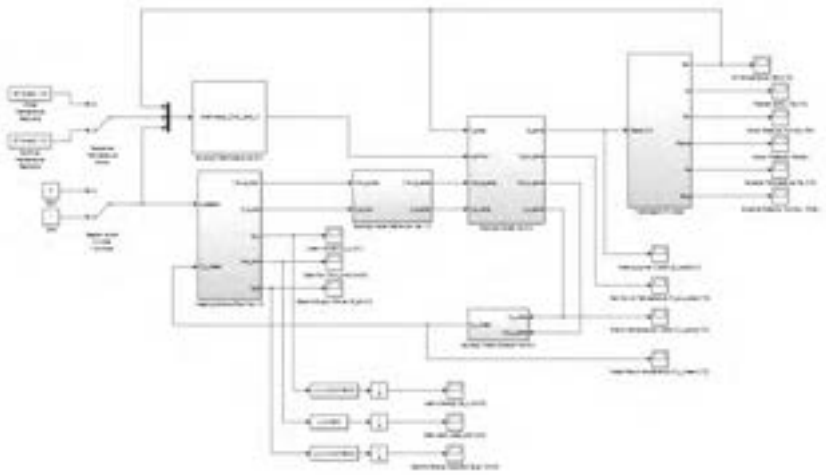
4.3.6 Il modello del Simulatore per un edificio termostatato con controllo dei consumi

La seconda fase di sviluppo del simulatore ha portato cambiamenti sostanziali rispetto al modello precedente. Sono stati, infatti, inseriti tre nuovi subsystem ed il sistema del generatore di calore è stato ulteriormente implementato creando una centrale termica che eroga acqua calda in inverno ed acqua fredda in estate.

I nuovi subsystem nel dettaglio sono:

- Il subsystem della Centrale termica con funzione switch
- Il subsystem del Distributore
- Il subsystem del Termostato
- Il subsystem dei Contatori Energetici

Nel corso del paragrafo andremo a soffermarci solo sull'analisi dei nuovi blocchi implementati, sui loro ingressi e sulle loro uscite, senza ritornare sulla descrizione delle sottofunzioni, già descritte nella sezione precedente.



Modello del Simulatore termostatato

4.3.7 Il subsystem del Centrale Termica con funzione switch

Il modello della centrale termica è stato riprogrammato inserendo a monte del subsystem uno switch (interruttore) a due posizioni che comanda il funzionamento invernale e quello estivo. La funzione che rappresenta la centrale presenta due variabili di ingresso e cinque variabili di uscita che sono:

INGRESSI
valore di ritorno della temperatura dell'acqua dal collettore T_r_mean [°C]
valore di switch estate/inverno c_season

USCITE

portata d'acqua uscita dalla centrale flow_h20_hcp	[kg/h]
temperatura di uscita del fluido vettore dalla centrale T_d	[°C]
potenza termica erogata dalla centrale Q_u	[W]
portata oraria di metano consumata flow_ch4	[m^3/h]
potenza elettrica consumata Q_e	[W]

Seguono ora delle valutazioni sulle nuove relazioni implementate nella S-function del subsystem per il funzionamento invernale e per quello estivo.

Funzionamento Invernale

La relazione che esprime la potenza termica erogata dalla caldaia è la seguente:

$$Q_u(i) = \dot{m}_{H2O} Cp_{H2O} \left(T_{d_hcp} - T_{r_mean}(i)\right)$$

Dove:

T_{d_hcp} = Temperatura dell'acqua di mandata	[˚C]
T_{r_mean} (i) = Temperatura dell'acqua di ritorno dal collettore	[˚C]
$\dot{m_{h2O}}$ = Portata massica di acqua calda	[kg/s]

Il valore della potenza termica Qu viene attualizzato ad ogni ciclo di calcolo sull'andamento della temperatura di ritorno; dalla Q_u è possibile risalire al consumo di energia primaria fissando il rendimento della caldaia η_b (fissato pari a 0.8) e si ha che:

$$Q_c(i) = \frac{Q_u(i)}{\eta_b}$$

Dove:

Q_c = Potenza di metano immessa nella caldaia [W]

Conoscendo il potere calorifico inferiore specifico di un metro cubo di metano, la portata in volume è calcolata con la successiva relazione:

$$\dot{V}_{CH4}(i) = \frac{Q_c(i)}{LHV_{CH4}}$$

Ovviamente in inverno il consumo elettrico della macchina frigorifera utilizzata per raffreddare l'acqua è nullo.

Funzionamento Estivo

La relazione che esprime la potenza termica erogata dal gruppo frigorifero è, ovviamente, la stessa della caldaia:

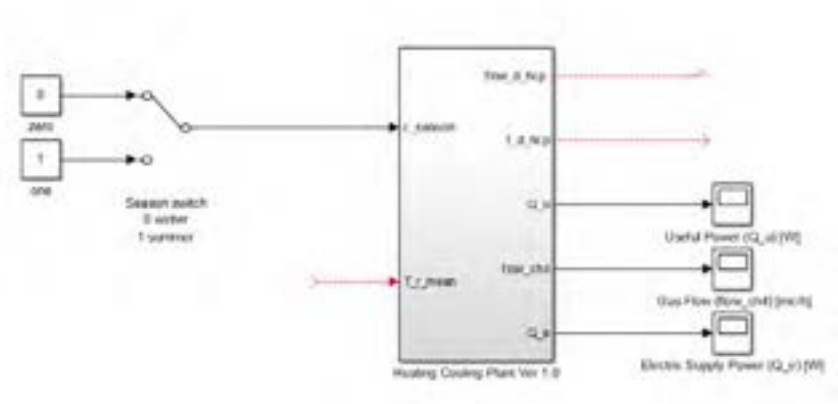
$$Q_u(i) = \dot{m}_{H2O} Cp_{H2O} \left(T_{d_hcp} - T_{r_mean}(i)\right)$$

Dove:
- T_{d_hcp} = Temperatura dell'acqua di mandata [˚C]
- T_{r_mean} (i) = Temperatura dell'acqua di ritorno dal collettore [˚C]
- $\dot{m_{h2O}}$ = Portata massica di acqua fredda [kg/s]

questa volta il valore ottenuto sarà negativo in quanto la temperatura di mandata è inferiore a quella di ritorno. La temperatura di mandata è stata impostata a 7˚C mentre la temperatura di ritorno è aggiornata ad ogni ciclo della simulazione essendo il risultato del bilancio energetico delle singole zone climatizzate. Il valore di Q_u viene attualizzato ad ogni ciclo di calcolo sull'andamento della temperatura di ritorno; dalla Q_u è possibile risalire al consumo elettrico della macchina frigorifera fissando il coefficiente di prestazione (coefficient of performance, COP), per ora impostato pari a 2.5:

$$Q_e(i) = \frac{|Q_u(i)|}{Cop}$$

Dove:
Q_e = Potenza elettrica assorbita dalla macchina frigorifera [W]



Subsystem della centrale Heating/Cooling

4.3.8 Il subsystem del Distributore

La funzione che rappresenta il distributore del fluido vettore presenta due variabili di ingresso e due variabili di uscita che sono:

INGRESSI
valore di mandata dell'acqua dalla centrale termica flow_h2o_hcp [kg/s]
temperatura dell'acqua di mandata T_d_hcp [°C]

USCITE
portata d'acqua d'invio al fancoil flow_h2o_zone [kg/s]
temperatura dell'acqua inviata al fancoil T_d_zone [°C]

Il distributore assegna la portata d'acqua calda/fredda erogata dalla centrale termica ai ventilconvettori presenti nelle zone dell'edificio. Per ora, nel calcolo non sono state prese in considerazione le perdite termiche lungo la rete; tuttavia queste possono essere inserite in un secondo momento con semplici integrazioni al codice.

Subsystem del Distributore

4.3.9 Il subsystem del Termostato

Il sottosistema del termostato presenta tre variabili di ingresso e una variabile di uscita che sono:

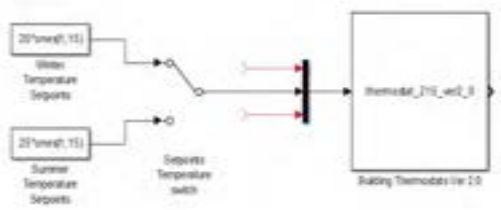
INGRESSI

valore della temperatura impostata nel set up	[°C]
temperatura dell'aria della zona	[°C]
valore di switch inverno/estate	

USCITE

portata oraria in volume erogata dal fancoil	[m^3/h]

Il termostato esegue il controllo per ogni zona climatica in cui è stato installato un ventilconvettore. Se la temperatura ambiente sale sopra il limite impostato nel set up, in inverno spegne la ventola del fancoil mentre in estate la accende, il processo inverso si verifica se la temperatura scende sotto un valore di soglia. Si avranno quindi due valori limite superiore ed inferiore di temperatura di settaggio sia per l'estate che per l'inverno. Con queste due operazioni cambia il valore di potenza termica scambiata per convezione tra lo scambiatore di calore e l'aria ambiente che lo lambisce.

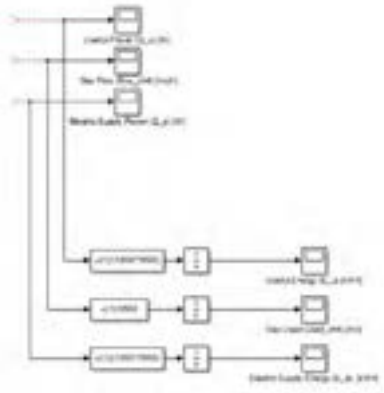


Subsystem del Termostato

4.3.10 Il subsystem dei Contatori Energetici

I contatori energetici altro non sono che tre blocchi integratori applicati a tre canali di uscita della centrale termica che possono essere elencati:

USCITE
energia termica erogata dalla centrale E_u [kWh]
metri cubi di metano consumato used_ch4 [m^3]
energia elettrica consumata E_e [kWh]



Subsystem dei Contatori Energetici

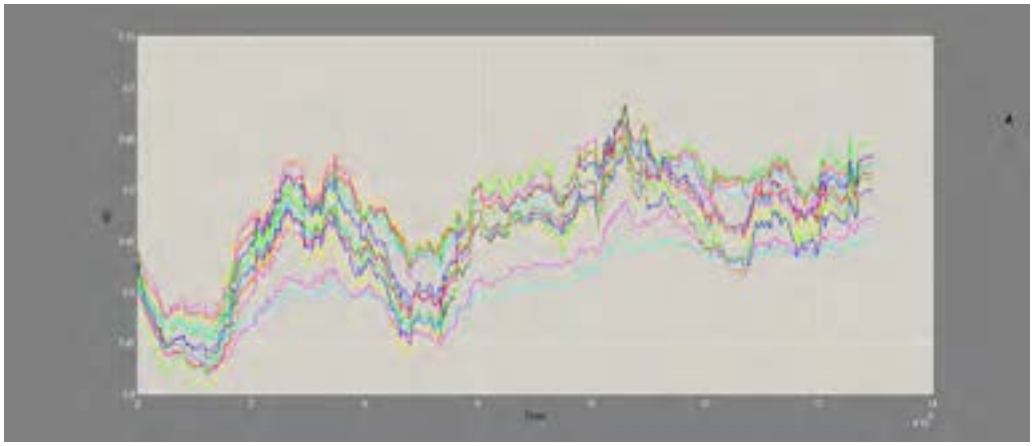
Gli integratori avranno lo scopo di integrare nell'intervallo del tempo di simulazione la potenza termica erogata dalla centrale, la portata di metano consumata e la potenza elettrica consumata fornendo per questi tre parametri dei valori in kWh e m^3. Queste verranno poi rielaborate per definire indicatori di performance energetica. Dagli andamenti ottenuti nell'output grafico si potranno fare delle considerazioni di tipo energetico e tenere sotto controllo i consumi di metano ed elettrici della centrale.

4.4 Riepilogo Possibili Output del Simulatore dell'edificio

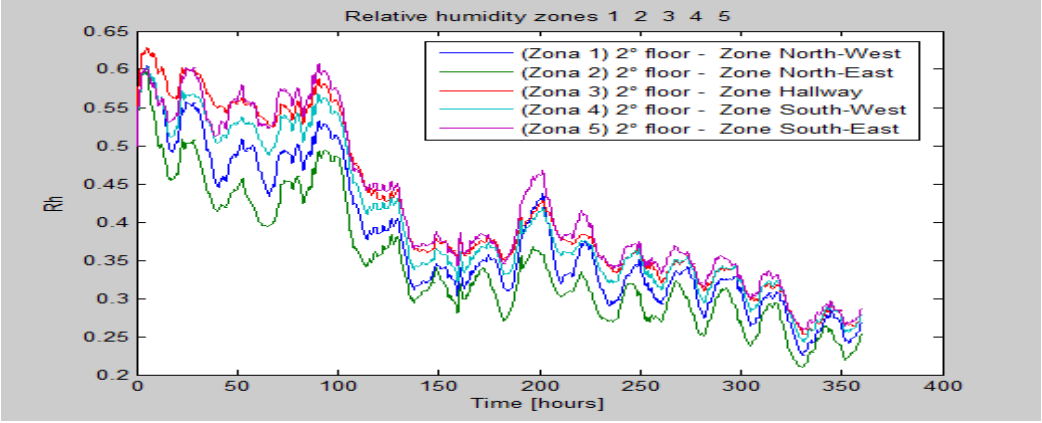
Alla fine della trattazione dei vari subsystem che compongono l'applicativo Simulink sviluppato, è importante fare un riepilogo delle variabili termodinamiche e delle variabili energetiche fornite in output dal simulatore. La tabella seguente fornisce l'elenco dei parametri termodinamici simulati, indicando anche il subsystem che genera in output il dato in questione. Il formato dell'output grafico fornito di default dall'HAMbase è stato anch'esso modificato. Infatti, quando sorge la necessità di lavorare con edifici composti da molte zone microclimatiche (anche 57) risulta impossibile analizzare con cura molte curve, di colore anche simile, sovrapposte fra loro. Per ovviare al problema è stato creato un file (Z15_plot.m) capace di fornire più plot separati fra di loro, stabilendo nello script del file le variabile termodinamica di cui fare il rafico e quali zone presentare in una slide. Vediamo degli esempi di output grafici forniti dallo scope dell'HAMbase e come sono stati scomposti gli andamenti della variabile umidità relativa interna in figure diverse divise per piani, con l'opportuna legenda dei colori.

Subsystem	Parametro Termodinamico	Simbolo	Unità di Misura
HAMbase	Temperatura Interna Aria	Tair	[˚C]
	Temperatura Radiante	Ts	[˚C]
	Umidità Relativa Interna	Rh	Adim
	Pressione Interna	Pzone	[Pa]
	Temperatura Esterna	Te	[˚C]
	Umidità Relativa Esterna	Rhe	Adim
FanCoil	Potenza Termica Fornita	Q_zone	[W]
	Temp. Radiante Fluido	T_r_zone	[˚C]
	Temp.Aria uscita Fancoil	T_out_zone	[˚C]
Collettore	Temp. Ritorno Collettore	T_r_mean	[˚C]
Centrale Termica	Potenza Termica Fornita	Q_u	W
	Portata Volumetrica Gas	flow_ch4	m^3/h
	Potenza Elettrica	Q_e	W
	Energia Termica Fornita	E_u	kWh
	Volume Gas Consumato	used_ch4	m^3
	Energia Elettrica Assorbita	E_e	kWh

Riepilogo Possibili Output



Umidità Relativa Interna default



Umidità Relativa Interna per zone

4.5 *Il modello del simulatore per una rete di edifici*

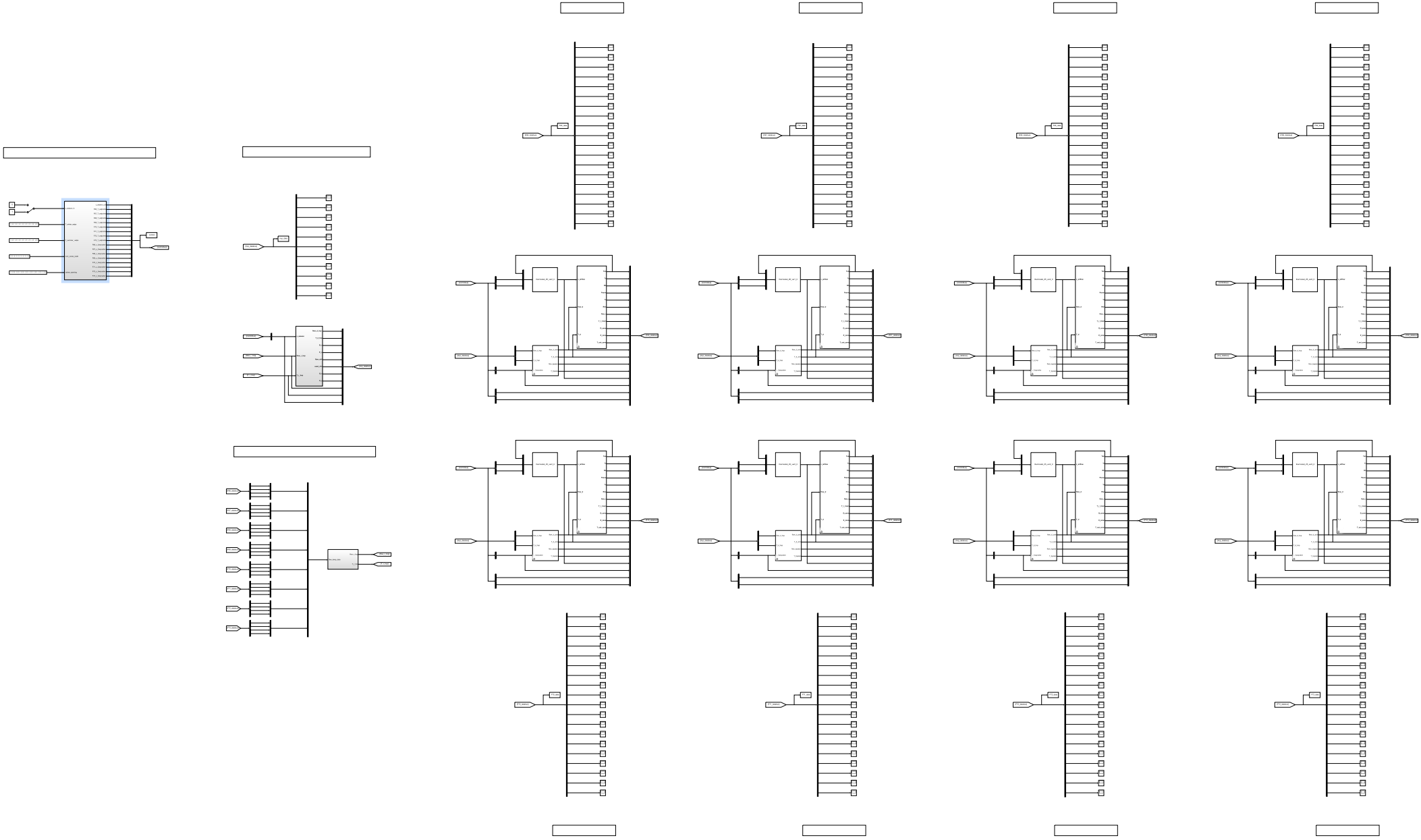
Il modello del simulatore per un singolo edificio è stato utilizzato come modulo base per la realizzazione del simulatore del cluster di otto edifici presente presso il Centro Ricerche Casaccia. Per ogni edificio del cluster è stato editato un proprio file di configurazione contenente la descrizione fisica ed i parametri termotecnici del rispettivo stabile. La S-function di HAMbase è stata poi modificata per consentire l'esecuzione parallela di più istanze Hambase senza errori.
Per semplificare al massimo lo schema ed aumentare la leggibilità dello stesso si è fatto pesantemente ricorso ai bus di segnale con notevole risparmio di collegamenti e quindi di eventuali incroci tra gli stessi. Lo schema generale del simulatore del cluster è riportato nella pagina seguente.

I blocchi fondamentali costituenti il simulatore del cluster di edifici sono:

- I subsystem degli edifici
- I subsystem dei termostati
- I subsystem dei distributori del fluido vettore di alto livello con modellazione delle valvole a 3 vie
- Il subsystem del collettore del fluido vettore di alto livello
- Il subsystem della centrale termica con contatori energetici integrati
- Il subsystem del generatore dei segnali di controllo

Oltre a questi blocchi funzionali, i molti segnali da monitorare per determinare lo stato in run-time dell'intero sistema sono stati raccolti in bus e successivamente sono stati fatti confluire verso blocchi di "scope", necessari per plottare l'andamento di tutte le variabili direttamente da Simulink. E' interessante sottolineare come nel cluster il controllo sulla potenza termica immessa per ciascuna zona sia aumentato di un grado di libertà per ogni edificio rispetto al modello per l'F40. In ciascun distributore del fluido vettore di alto livello è stata inserita, infatti, una valvola a tre vie, la cui apertura può essere direttamente controllata. Variando la percentuale di apertura delle valvole è possibile controllare anche la portata del fluido vettore che arriva direttamente ai fancoil. Il controllo quindi può essere attuato, sia mediante la velocità di ventilazione, che tramite una variazione di apertura delle valvole, avendo quindi una maggiore capacità di regolazione.

Nei sottoparagrafi successivi verrà analizzato in dettaglio ogni blocco costituente.



Schema generale del modello Simulink del Cluster

4.5.1 I subsystem degli edifici.

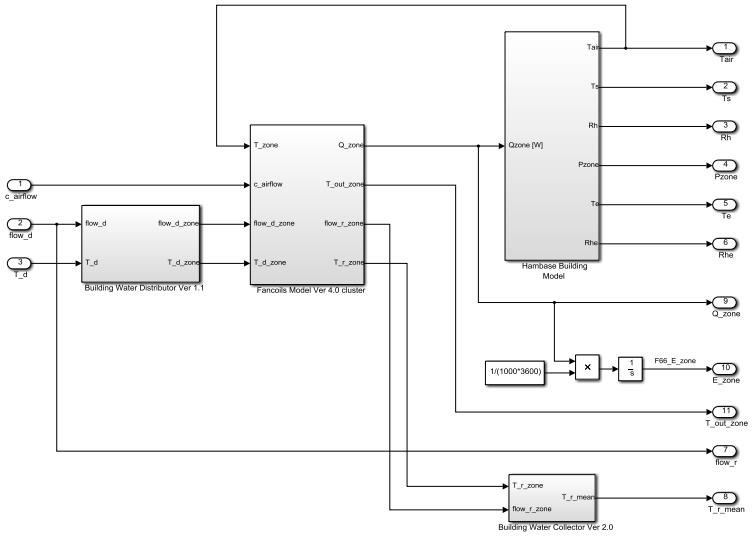
Per ciascun edificio costituente il cluster nel modello Simulink è presente un sottosistema contenente rispettivamente il blocco HAMbase, il blocco implementante il modello dei fancoil, il distributore ed il collettore del fluido vettore a livello dell'edificio. Il funzionamento di tutti questi componenti, già descritto nei paragrafi precedenti, viene comunque riportato sinteticamente a seguire. Gli ingressi e le uscite del sottosistema esaminato sono:

INGRESSI

c_airflow: velocità di ventilazione dei fancoil	[valori componenti da 0 a 3] (vettoriale)
flow_d: portata massica di mandata fluido vettore all'edificio	[kg/s] (vettoriale)
T_d : temperatura di mandata all'edificio del fluido vettore	[°C] (vettoriale)

USCITE

Tair: temperatura dell'aria nelle zone	[°C] (vettoriale)
Ts: temperatura radiante per ciascuna zona	[°C] (vettoriale)
Rh : umidità relativa indoor	[%] (vettoriale)
Pzone: pressione indoor per ciascuna zona	[Pa] (vettoriale)
Te: temperatura dell'aria esterna	[°C] (scalare)
Rhe: umidità relativa esterna	[%] (scalare)
Q_zone: potenza termica immessa per ciascuna zona	[W] (vettoriale)
E_zone: energia termica immessa per ciascuna zona	[kWh] (vettoriale)
T_out_zone: temperatura dell'aria d'uscita dai fancoil	[°C] (vettoriale)
flow_r: portata massica fluido vettore di ritorno d'edificio	[kg/s] (scalare)
T_r_mean: temperatura media pesata del fluido vettore di ritorno a livello d'edificio.	[°C] (scalare)



Particolare dei componenti costituenti il subsystem "F66 Building n°1"

Il distributore dell'edificio *Building Water Distributor* riceve in ingresso la portata del fluido vettore diretta allo specifico edificio e la sua temperatura e fornisce in uscita il vettore *flow_d_zone,* le cui componenti sono le portate del fluido vettore distribuito verso ciascuna zona climatica, e *T_d_zone* la rispettive temperature. Tali portate e temperature sono a loro volta gli ingressi del blocco che modella i fancoil, insieme all'ingresso vettoriale di controllo delle velocità di ventilazione *c_airflow* e al vettore delle temperature di ciascuna zona microclimatica *Tair*. Quest'ultimo costituisce, nello specifico, il segnale di feedback per il controllo.

In uscita il subsystem dei fancoil impone la potenza termica per ogni zona *Q_zone* e fornisce le temperature dell'aria d'uscita per ogni zona *T_out_zone* e la portata e la temperatura dell'acqua di ritorno dalle zone climatiche (*flow_r_zone*, *T_r_zone*).
Il blocco Hambase modella l'edificio e calcola tutti i parametri termotecnici delle zone microclimatiche analizzate e le condizioni climatiche esterne. Il collettore di edificio calcola invece la portata di uscita del fluido vettore e la temperatura media risultante facendo una media delle temperature pesata sulle portate. Infine un blocco integratore permette il calcolo dell'energia termica fornita a ciascuna zona.

4.5.2 I subsystem dei termostati

Ogni edificio del cluster presenta un subsystem che implementa la funzione dei termostati, che è identica a quella del termostato analizzato nel paragrafo 4.3.9. In particolare il controllo utilizzato è di tipo on/off con isteresi. In uscita si ha la potenza termica istantanea fornita ad ogni zona microclimatica. Gli ingressi permettono di imporre la temperatura di setpoint per ciascuna zona microclimatica, l'impostazione estate/inverno (*c_season*) e il feedback con le temperature indoor istantanee (*T_air*) delle zone nell'edificio. Riportiamo qui per comodità l'elenco degli ingressi e delle uscite di questa S-function:

INGRESSI

Fxx_Tair: : temperatura dell'aria nelle zone per l'edificio Fxx	[°C] (vettoriale)
Fxx_T_setpoint: temperatura di setpoint per ciascuna zona edificio	Fxx [°C] (vettoriale)
c_season: valore di switch estate/inverno	(booleano)

USCITE

c_airflow: velocità di ventilazione dei fancoil	[valori componenti da 0 a 3] (vettoriale)

4.5.3 I subsystem dei distributori del fluido termovettore con modellazione di valvole a 3 vie

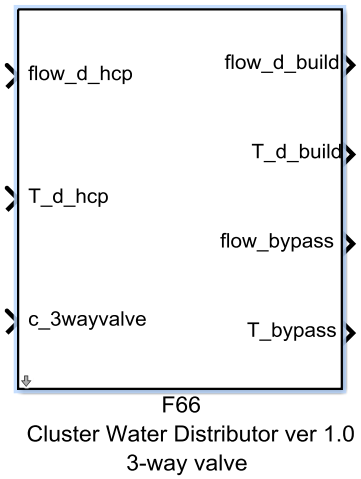
Per ogni edificio è presente un sottosistema denominato "cluster water distributor". Gli ingressi e le uscite di questo sottosistema sono:

INGRESSI

c_3wayvalve: percentuale apertura valvola a tre vie	[valori da 0 a 100] (scalare)
flow_d_hcp: portata massica fluido vettore da centrale termica	[kg/s] (scalare)
*T_d_*hcp: temperatura di mandata fluido vettore da centrale termica	[°C] (vettoriale)

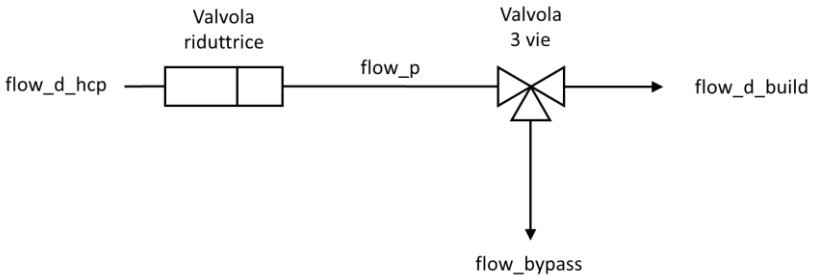
USCITE

flow_d_zone: Portata massica fluido termovettore per zona	[kg/s] (vettoriale)
T_d_zone: Temperatura fluido termovettore per zona	[°C] (vettoriale)
Flow_bypass: Portata massica fluido termovettore di bypass	[kg/s] (scalare)
T_bypass: Temperatura fluido termovettore di bypass	[°C] (scalare)



Subsystem distributore di alto livello

Questi distributori del fluido vettore a livello del cluster implementano le funzioni di riduttori di portata e di valvole deviatrici a tre vie. L'implementazione della valvola a tre vie segue lo schema illustrato di seguito:



Schema valvola a tre vie

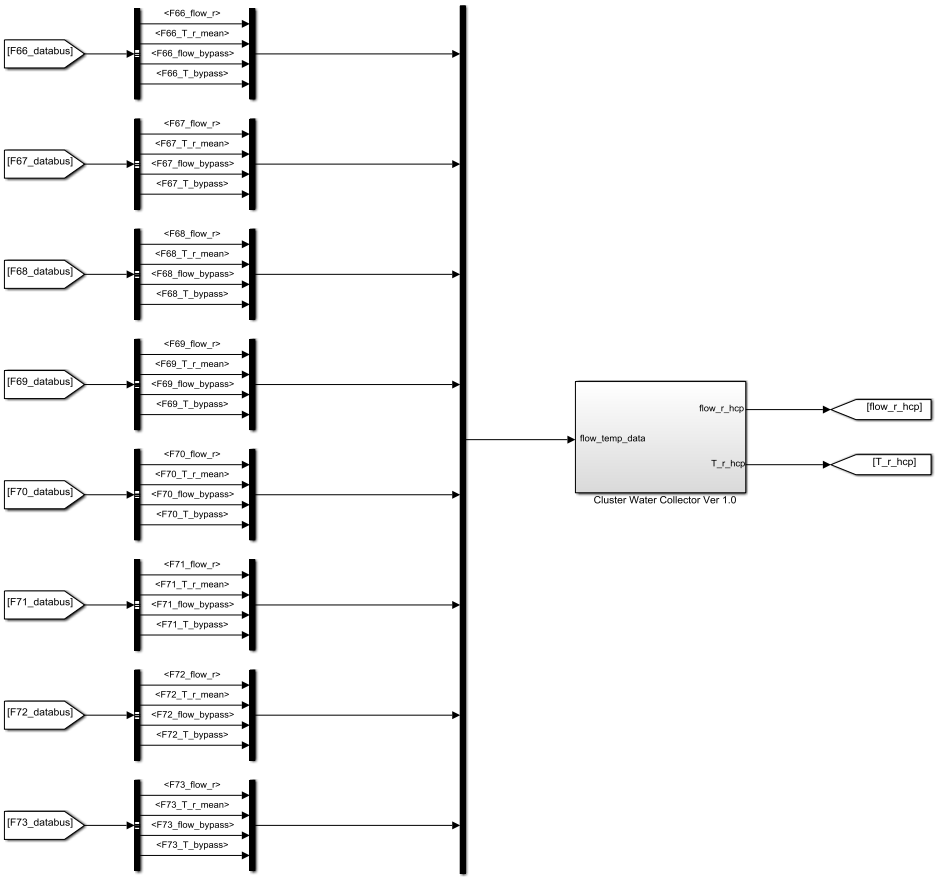
La portata massima dell'acqua di mandata all'edificio viene calcolata nella S-function del distributore, conoscendo il numero di fancoil totale del cluster e il numero di fancoil presenti nell'edificio specifico in esame. Successivamente, l'acqua diretta all'edificio viene parzializzata tramite una valvola a tre vie dando origine a due flussi: quello utile diretto ai fancoil dell'edificio e il flusso di bypass che viene riportato direttamente verso il collettore di edificio. A questo livello si miscelerà con il fluido vettore in uscita dai fancoil dando origine al fluido di ritorno di edificio. In formule:

$$flow_{d_{build}} = flow_p - flow_{bypass}$$

4.5.4 Il subsystem del collettore del fluido vettore di alto livello

Per determinare la portata *flow_r_hcp* del fluido vettore di ritorno in centrale termica è necessario sommare le portate del fluido di ritorno dalle zone climatiche e le portate di bypass dovute alle valvole a tre vie.

Per quanto riguarda la temperatura di ritorno dell'acqua in centrale *T_r_hcp,* questa sarà data da una media pesata delle temperature di ritorno sulle rispettive portate. Il subsystem che realizza queste funzioni è il collettore a livello del cluster denominato *Cluster Water Collector*.



Schema del collettore di alto livello

Gli ingressi e le uscite di questo blocco funzionale in dettaglio sono:

INGRESSI

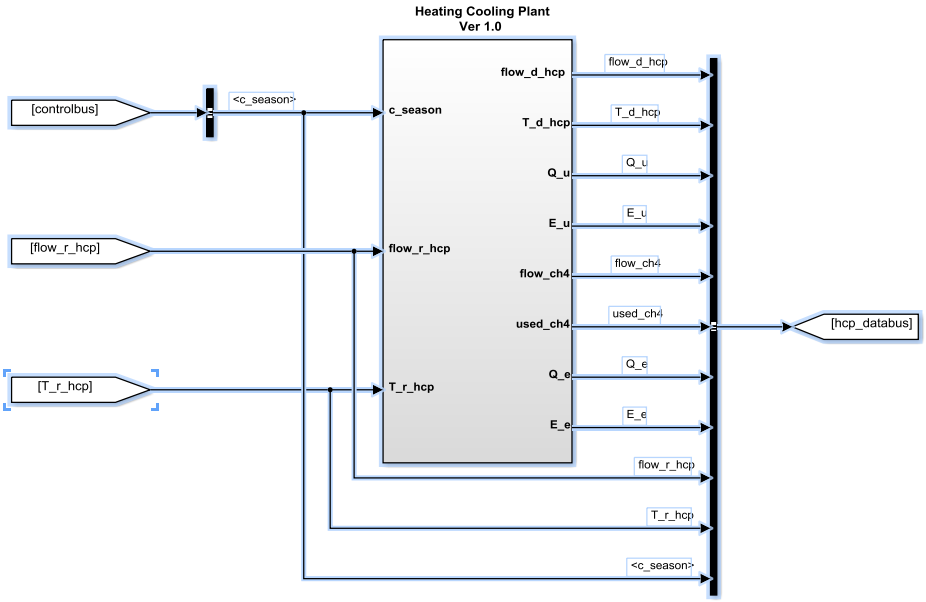
Fxx_flow_r: Portata massica fluido termovettore di ritorno fancoil edificio Fxx	[kg/s] (scalare)
Fxx_T_r_mean: Temperatura di ritorno fluido termovettore dai fancoil dell'edificio Fxx	[°C] (scalare)
Fxx_flow_bypass: Portata massica fluido termovettore di bypass edificio Fxx	[kg/s] (scalare)
Fxx_T_bypass: Temperatura di ritorno fluido termovettore di bypass dell'edificio Fxx	[°C] (scalare)

USCITE

flow_r_hcp: Portata massica fluido termovettore di ritorno in centrale termica	[kg/s] (scalare)
T_r_hcp: Temperatura fluido termovettore di ritorno in centrale termica	[°C] (scalare)

4.5.5 Il subsystem della centrale termica con contatori energetici integrati

La centrale termica e i contatori energetici visti nei paragrafi 4.3.7 e 4.3.10 sono stati riuniti per il cluster in un unico blocco funzionale denominato *Heating/Cooling Plant*. Si rimanda ai paragrafi precedenti per ulteriori dettagli.



Schema della centrale termica con contatori energetici integrati

Di seguito sono riportati gli ingressi e le uscite per questo blocco:

INGRESSI

c_season: valore di switch estate/inverno	(booleano)
flow_r_hcp: Portata massica fluido termovettore di ritorno in centrale termica	[kg/s] (scalare)
T_r_hcp: Temperatura fluido termovettore di ritorno in centrale termica	[°C] (scalare)

USCITE

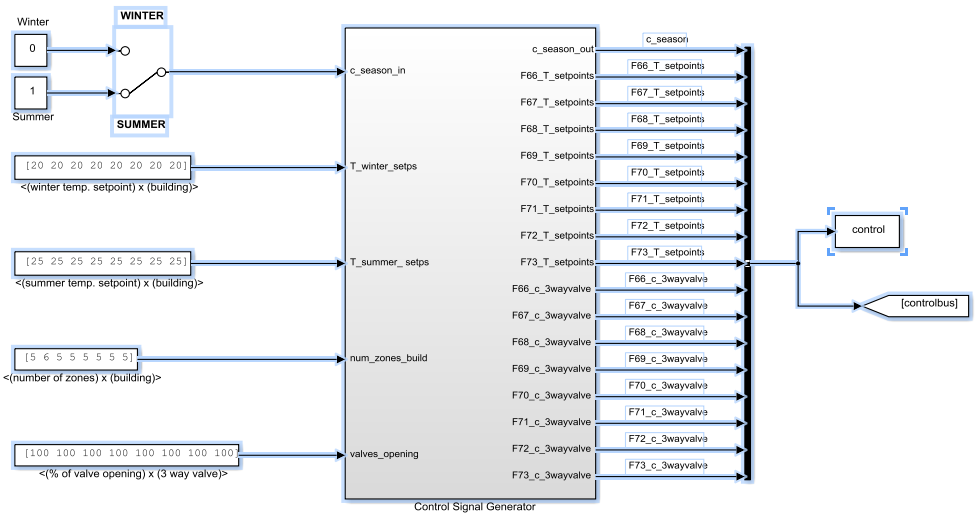
flow_d_hcp: portata massica fluido vettore da centrale termica	[kg/s]
*T_d*_hcp: temperatura di mandata fluido vettore da centrale termica	[°C]
Q_u: potenza termica utile fornita dalla centrale	[W]
E_u: energia termica utile fornita dalla centrale	[kWh]
flow_ch4: portata metano utilizzato in centrale	[mc/h]
used_ch4: metri cubi di metano consumato in centrale	[m^3]
Q_e: potenza elettrica richiesta dalla centrale	[W]
E_e: energia elettrica consumata in centrale	[kWh]

4.5.6 Il subsystem del generatore di segnali di controllo

Per poter effettuare le simulazioni nel cluster è necessario fornire un numero piuttosto elevato di parametri di setpoint o di controllo. In particolare è necessario imporre:

i. Le temperature di setpoint per ciascuna zona microclimatica.
ii. La stagione (estate/inverno) di funzionamento per la centrale termica.
iii. Il grado di apertura di ciascuna valvola a 3 vie.

Per poter variare e formattare correttamente tutti questi parametri è stato creato un sottosistema denominato *Control Signals Generator* che ha proprio la funzione di "formattare" correttamente i valori dei parametri e di incanalarli in un bus di controllo in modo da poter essere referenziati più facilmente nei blocchi funzionali dove necessitano.



Schema del generatore dei segnali di controllo

Gli ingressi e le uscite in dettaglio di questo blocco funzionale sono:

INGRESSI

c_season_in: valore di switch estate/inverno	(booleano)
T_winter setps: temperature di setpoint invernali per edificio	[°C] (vettoriale)
T_summer_setps: temperature di setpoint estive per edificio	[°C] (vettoriale)
num_zones_build: numero di zone per edificio	(vettoriale)
valves_opening: percentuale di apertura valvole a 3 vie	[range 0-100] (vettoriale)

USCITE

flow_d_hcp: portata massica fluido vettore da centrale termica	[kg/s]
c_season_out: valore di switch estate/inverno	(booleano)
Fxx_T_setpoints: Temperature di setpoint zone edificio Fxx	[°C] (vettoriale)
Fxx_c_3wayvalve: percentuale di apertura valvole a 3 vie	[range 0-100] (vettoriale)

5 Risultati

In questo capitolo si riportano, sotto forma di grafici, i principali output ottenibili dal sistema.
Le simulazioni sono state fatte per modello di edificio a 15 zone, per quello a 57 zone e per il modello del cluster di edifici. Ciascuna simulazione è stata svolta i) per due località climatiche (Ancona e Roma); ii) per due stagioni dell'anno (estate ed inverno); iii) in modalità free-running (cioè senza riscaldamento e condizionamento) ed iv) in modalità riscaldamento/condizionamento con termostato (setpoint invernale 20 °C, estivo 25°C).

I principali risultati si dividono in:

- variabili che influenzano il confort: temperatura interna, umidità relativa, temperatura media radiante delle pareti, temperatura di uscita dell'aria dal ventilconvettore;
- variabili caratteristiche di impianto: temperatura di ritorno dell'acqua dai ventilconvettori di ciascuna zona, temperatura media di ritorno dell'acqua;
- variabili che servono per la formazione di KPIs (key performance indicators): potenza istantanea (fornita/sottratta) da ciascuna zona; energia utile cumulata (fornita/sottratta) assorbita, da ciascuna zona; consumo annuo di energia elettrica e metano.

La mole di dati e risultati è ovviamente elevata, per questo nei paragrafi successivi viene presentata una selezione di questi.

Il paragrafo 5.1 riporta i risultati delle simulazioni per il modello di edificio a 15 zone. In questo paragrafo presentiamo la maggior parte dei risultati in maniera dettagliata per tre ragioni: primo, vogliamo dimostrare le potenzialità e la flessibilità del simulatore sviluppato; secondo, vogliamo evitare di appesantire la relazione: una volta visti i possibili output del sistema, nei paragrafi successivi, vengono presentati soltanto una parte dei risultati ottenuti per il modello a 57 zone e per il cluster. Infine, perché il modello 15 zone è quello su cui si è scelto di lavorare per sviluppare le metodologie di ottimizzazione da implementare sull'edificio F40 essendo quello che ha dimostrato di avere un buon livello di dettaglio energetico con poca spesa computazionale.

In particolare, i risultati presentati nel paragrafo 5.1, si riferiscono ad un periodo di simulazione di 60 giorni invernali (a partire dal 1° Dicembre) e di 60 giorni estivi (a partire dal 1° Giugno); le simulazioni sono state svolte sia in free running, per vedere il comportamento dell'edificio, sia inserendo un controllo di temperatura attraverso un termostato. In quest'ultimo caso il sistema di riscaldamento e condizionamento è programmato per mantenere la temperatura di setpoint nelle varie zone (20°C in inverno, 25°C in estate). I risultati vengono presentati sia per Ancona che per Roma; una sintesi dei dati meteo delle due località è riportata in Appendice.

Nel paragrafo 5.2 sono riportati i risultati delle simulazioni per il modello di edificio a 57 zone. Il fine è quello di dimostrare la possibilità di simulare nel dettaglio anche un edificio complesso. Anche per l'edificio a 57 zone, come per quello a 15, sono state fatte simulazioni in free running e con termostato in due località (Ancona e Roma) sia in estate che in inverno. Il paragrafo 5.2 presenta i risultati delle simulazioni per 30 giorni invernali, località Roma: temperatura interna, umidità relativa e temperatura media radiante delle pareti di tutte le 57 zone.

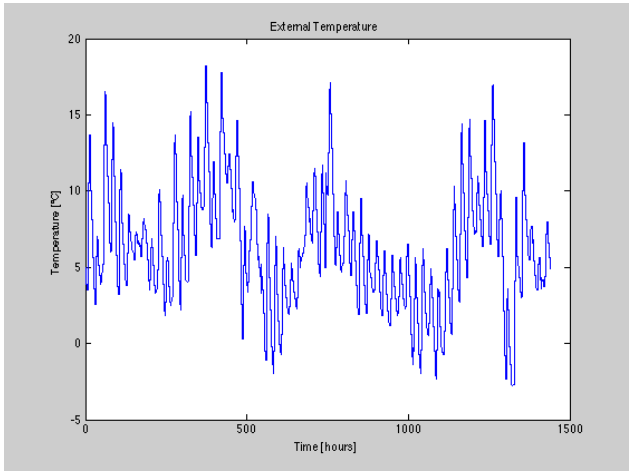
Nel paragrafo 5.3 presentiamo i risultati per il cluster di edifici. I risultati si riferiscono alla simulazione di 15 giorni estivi, località Roma. I risultati presentati sono: temperatura interna, umidità relativa e temperatura media radiante per ciascuna delle 5 zone di ogni edificio del cluster; andamento della potenza frigorifera e dell'energia frigorifera assorbita da ciascun edificio; consumo energetico del gruppo frigorifero a servizio del cluster di edifici.

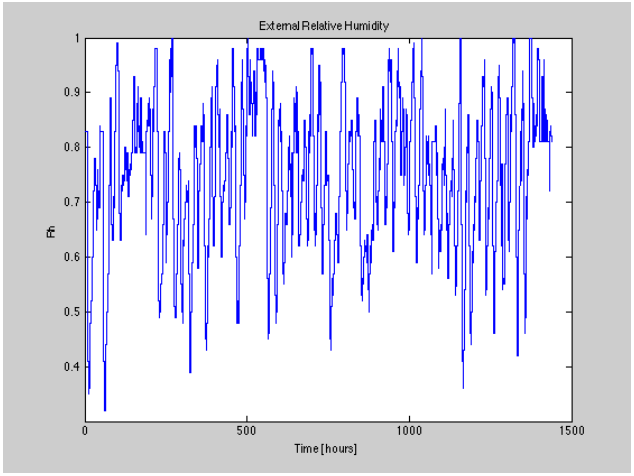
5.1 Risultati simulazioni per l'edificio a 15 zone

5.1.1 Simulazioni Ancona 60 giorni invernali free running

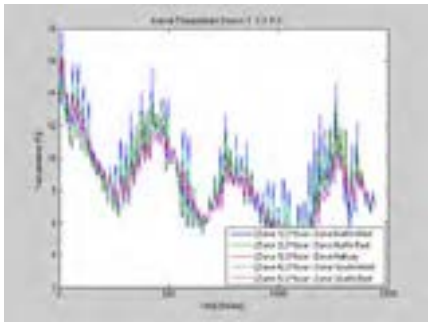
Le simulazioni free-running mostrano un ottimo accordo tra andamento dei parametri climatici interni con quelli esterni. In particolare la temperatura interna segue, con sfumature differenti, l'andamento di quella esterna. Il secondo piano, caratterizzato da una maggior superficie esterna (pareti e tetto) ha un andamento molto vicino a quello della temperatura esterna. Lo stesso andamento, seppur attenuato si può notare sia nel primo piano, sia nel pianoterra.

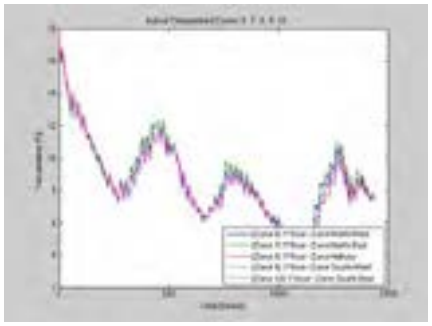
Dati climatici esterni

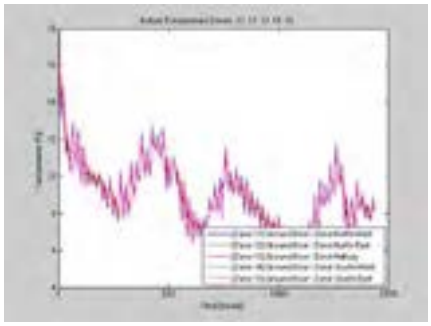




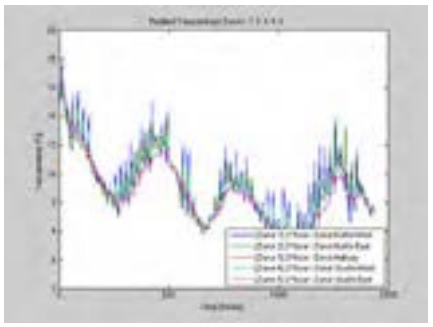
Temperatura interna

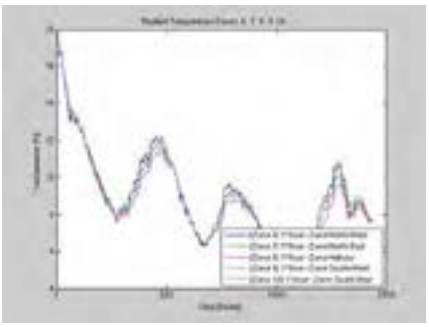


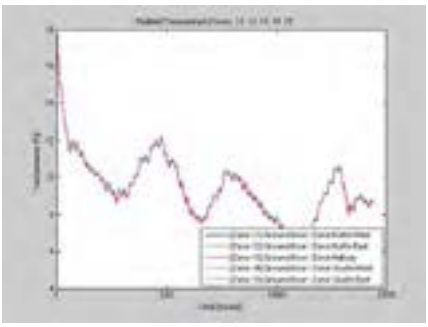




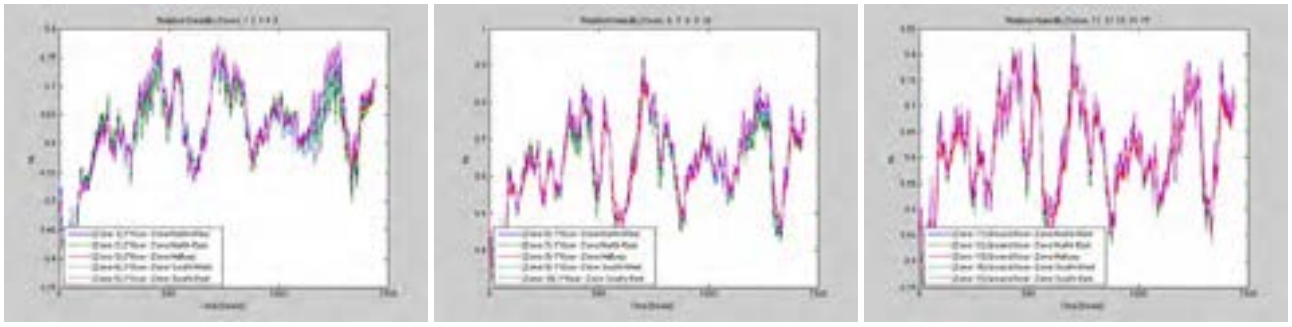
Temperatura media radiante delle pareti







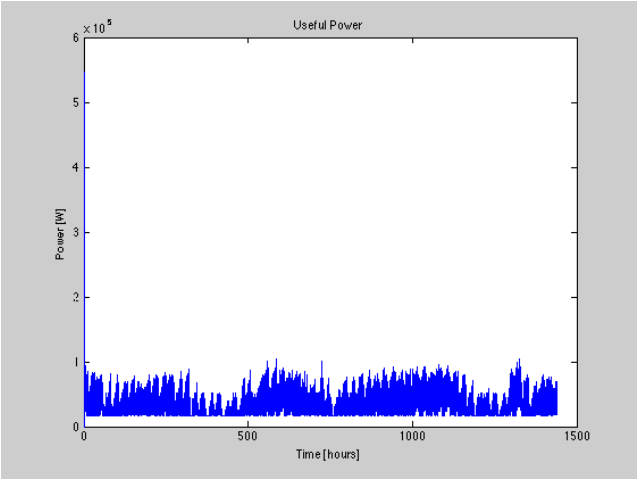
Umidità relativa interna

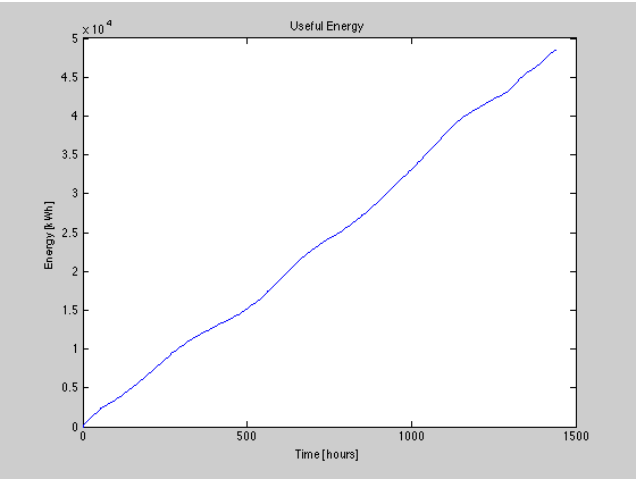


5.1.2 Simulazioni Ancona 60 giorni invernali termostato

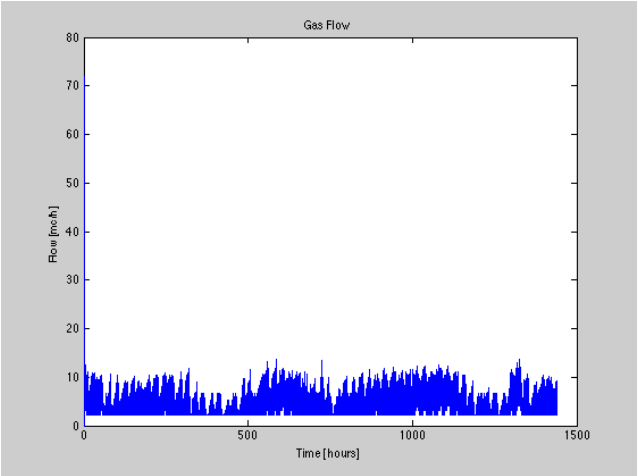
Rispetto alle simulazioni in free running, nelle simulazioni con termostato subentrano le variabili di funzionamento relative ai ventilconvettori ed alla centrale termica, nonché i dati di consumo dell'edificio, utili per definire indicatori di performance energetica. Anche se l'edificio F40 è servito da una rete di teleriscaldamento, nella simulazione, come già anticipato, abbiamo supposto la presenza di una caldaia in centrale termica; questo spiega l'utilizzo del termine "useful energy" e "useful power", cioè la potenza e l'energia effettivamente cedute agli ambienti a valle del sistema di conversione energetica (caldaia) e del sistema di distribuzione del calore. Dalle grandezze "useful" si risale poi a quelle primarie attraverso i rendimenti di distribuzione (per ora ipotizzati pari a 1) e a quello di caldaia (ipotizzato pari a 0.8). I grafici relativi alla temperatura di ritorno dell'acqua dalle singole zone alla centrale termica, gli andamenti della temperatura di uscita dell'aria dai ventilconvettori, dell'energia utile, della potenza fornita a ciascuna zona, così come l'andamento della temperatura interna mostrano quanto già anticipato nelle simulazioni in free running dell'edificio per lo stesso periodo: il secondo piano è molto più soggetto a dispersioni degli altri due piani sottostanti essendo a contatto con il tetto. Questo lo si può vedere sia in forma aggregata confrontando il consumo di energia termica di ciascuna delle zone di ogni piano, sia in maniera puntuale confrontando la potenza termica fornita loro. Infatti, si nota chiaramente come nei giorni in cui la temperatura è più alta e quindi presumibilmente il cielo sereno e gli apporti solari maggiori, si abbia una generale riduzione della potenza termica fornita all'edificio pur con differenze notevoli tra il secondo piano e gli altri due. Mentre nel secondo piano i ventilconvettori sono quasi sempre in funzione, nel primo piano e nel piano terra si notano chiaramente i periodi di spegnimento. L'analisi dell'andamento della temperatura interna di ciascuna zona, che è anche e soprattutto la variabile di controllo del termostato, spiega questo andamento: quando il termostato rileva un certo scostamento ΔT (±0.5°C o ±1°C) della temperatura ambiente dal valore di setpoint, questo accende o spegne il ventilconvettore all'interno di una zona; l'effetto dell'accensione e dello spegnimento del ventilconvettore sulla temperatura è quasi immediato. Nelle simulazioni svolte le accensioni e gli spegnimenti orari sono nell'ordine di 2-3. L'andamento della temperatura interna dimostra che nelle giornate relativamente miti gli apporti gratuiti, specialmente nel pianoterra e nel primo piano mantengono la temperatura ambiente nell'intorno della temperatura di setpoint evitando l'accensione del ventilconvettore che, occorre sottolinearlo, continua a fornire un minimo di potenza termica (come dimostra il fatto che la potenza termica fornita non è mai pari a zero) . L'accensione dei fancoil viene simulata attraverso le 3 differenti velocità del suo ventilatore; quando il fancoil è spento e la sua velocità è zero, l'acqua al suo interno continua a circolare ed esso continua a fornire una potenza minima lavorando come termoconvettore. Quando il ventilconvettore è spento la dinamica delle zone è molto simile a quella vista per il free running dell'edificio. Tutto il processo appena descritto, ha ovviamente ripercussioni su tutte le variabili del sistema, temperatura di ritorno di ciascuna zona, temperatura di uscita dell'aria dal ventilconvettore, umidità relativa e temperatura media radiante delle pareti. Una ultima osservazione riguarda l'andamento a sé stante dei locali non riscaldati come i corridoi. Un confronto con il free running dell'edifico evidenzia che il leggero differente andamento è da imputare al fatto che molte zone a contatto con i corridoi, in questo caso, sono riscaldate.

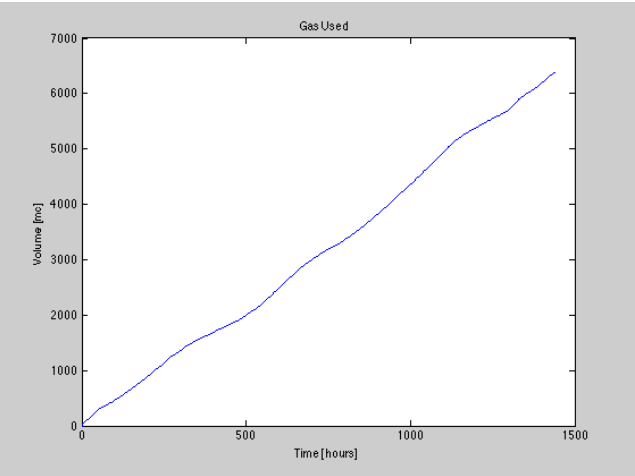
Potenza ed energia utili fornite all'edificio per riscaldamento



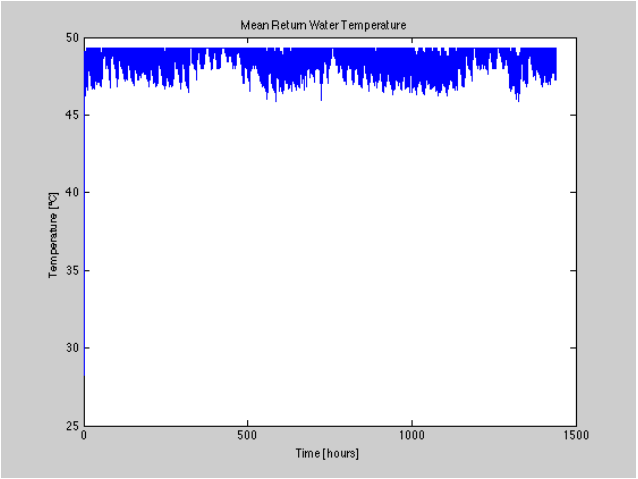


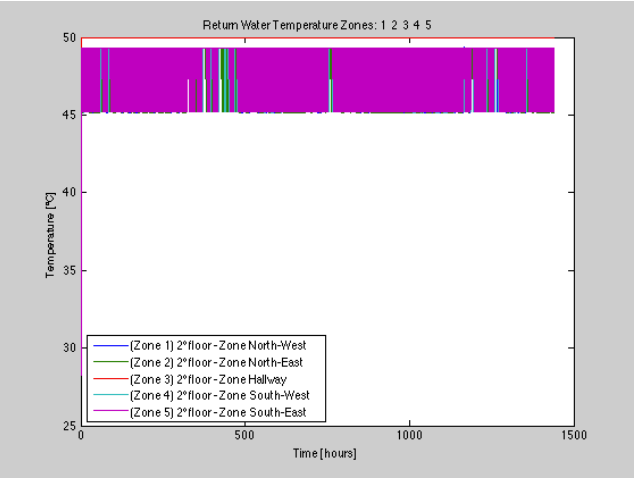
Consumo orario e consumo cumulato di gas naturale

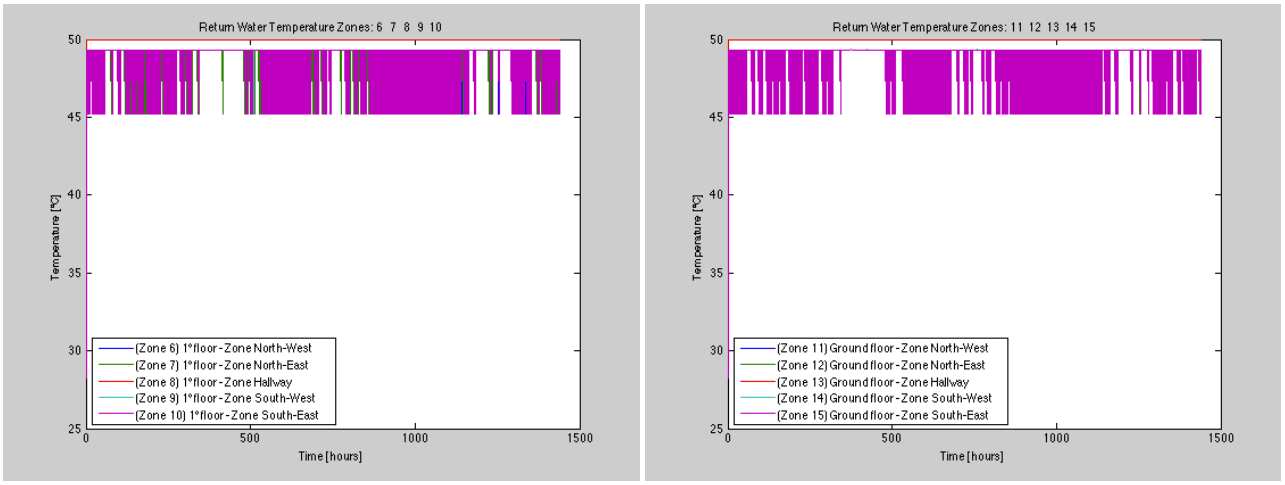




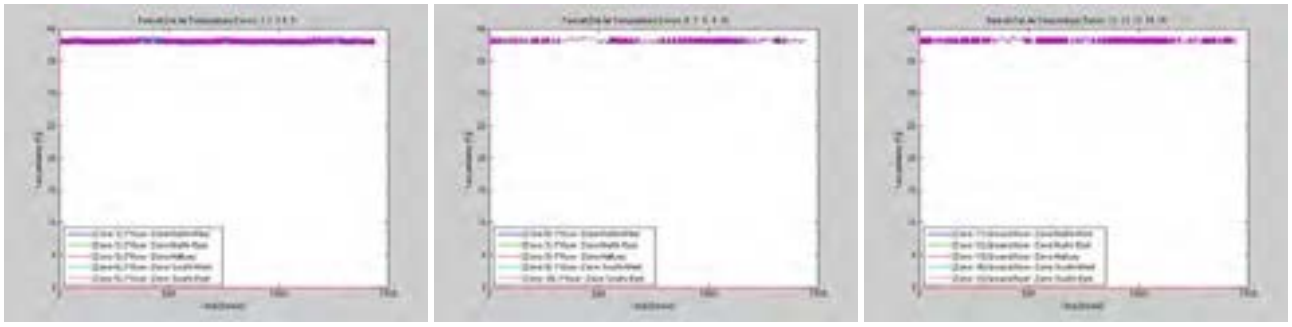
Temperatura media di ritorno dell'acqua in centrale termica e temperatura di ritorno da ciascuna zona



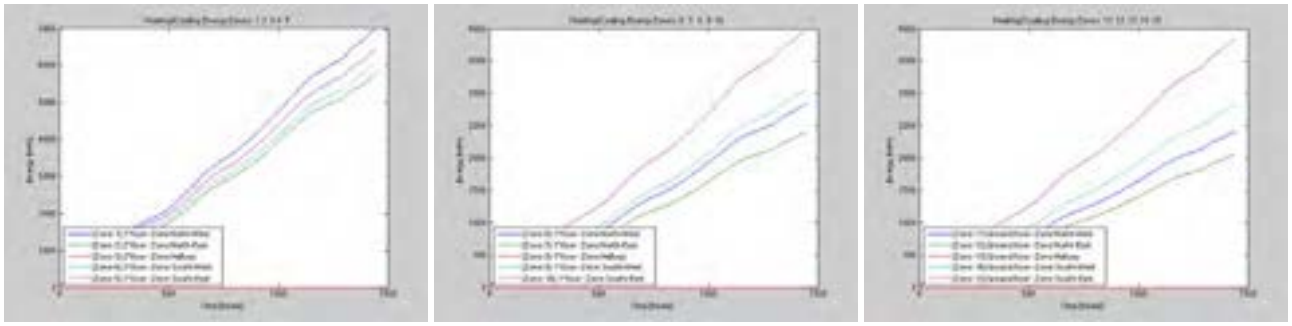




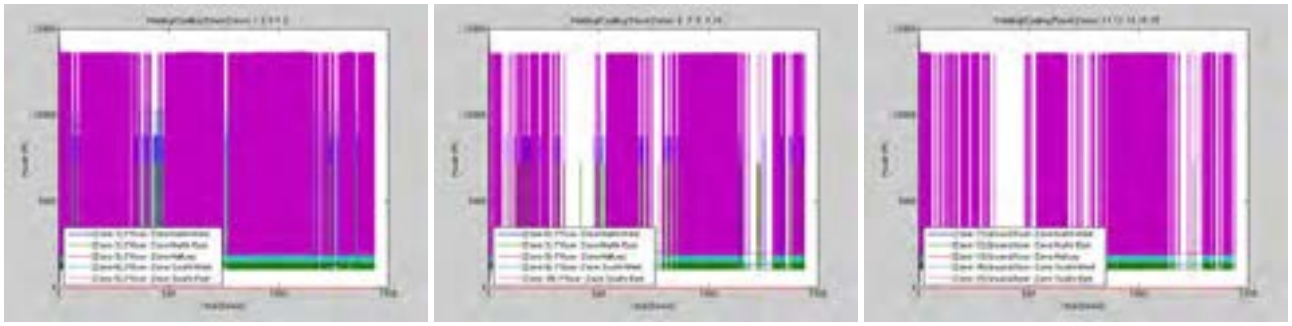
Temperatura di uscita dell'aria dai ventilconvettori



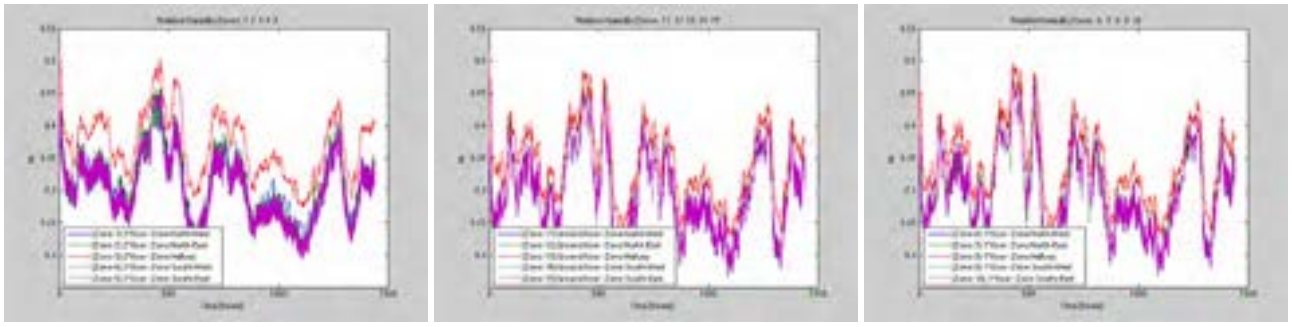
Energia utile fornita a ciascuna zona



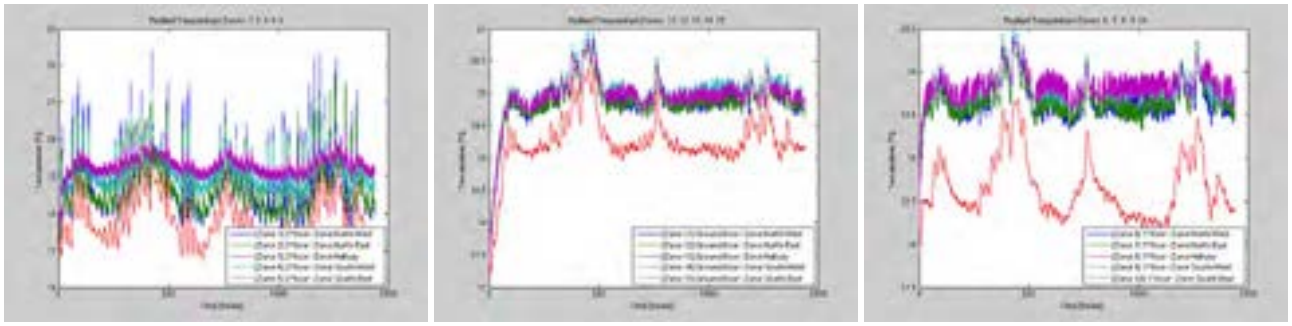
Potenza termica ceduta in ciascuna zona



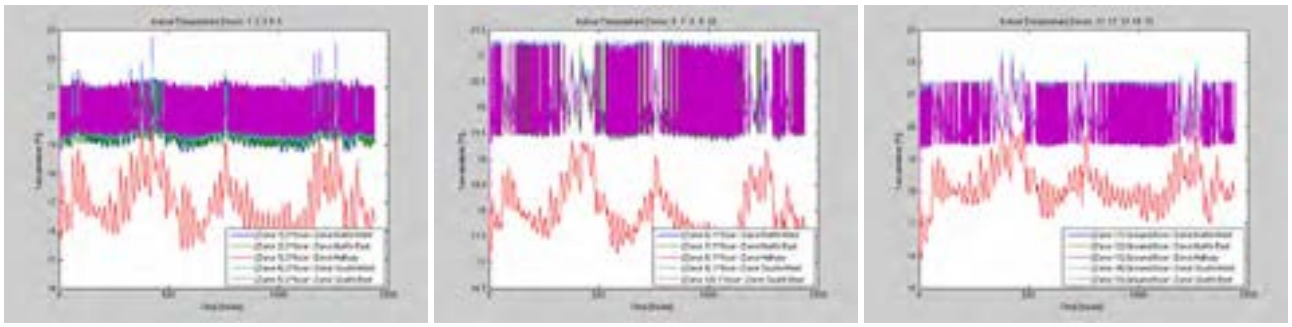
Umidità relativa



Temperatura media radiante delle pareti



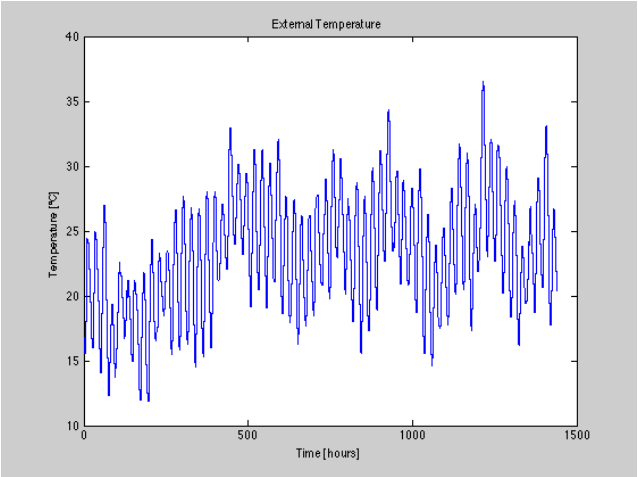
Temperatura interna

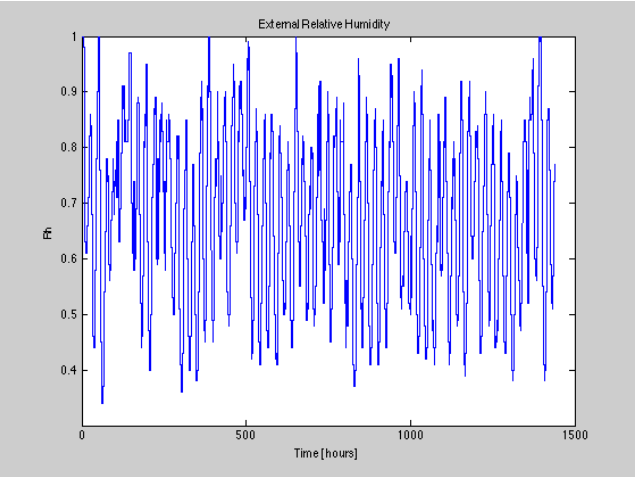


5.1.4 Simulazioni Ancona 60 giorni estivi free running

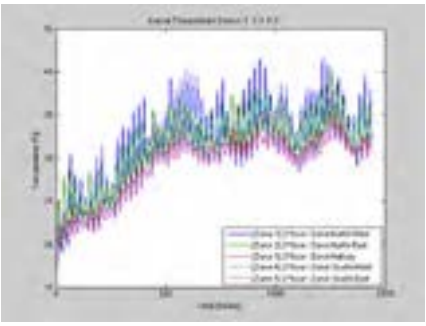
Per le simulazioni estive sia in free running che con termostato, si possono fare molte delle considerazioni già espresse nel paragrafo precedente. In particolare, per il free running estivo si può osservare come l'andamento delle temperature interne rispecchi l'andamento di quella esterna, pur con differenze tra le varie zone ed i vari piani. In particolare, le zone del secondo piano sono di nuovo quelle più critiche, superando anche di 5°C la temperatura della corrispondente zona al primo piano (per esempio zona nord-ovest). Il piano terra risulta meno sollecitato termicamente, rispetto agli altri due piani.

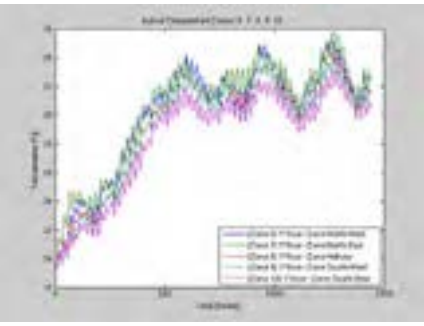
Dati climatici esterni

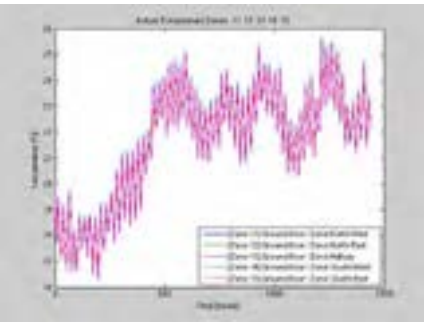




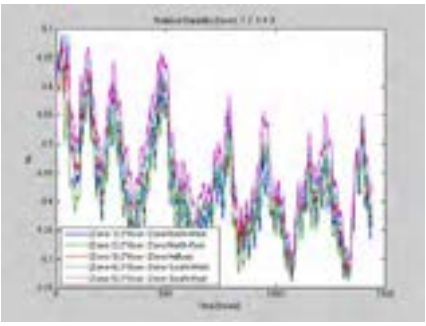
Temperatura interna

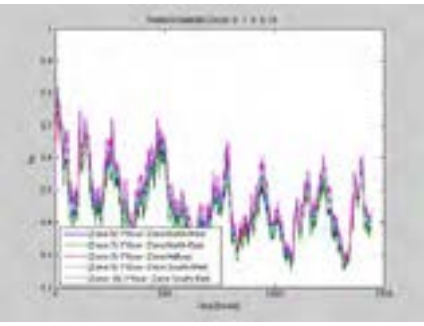


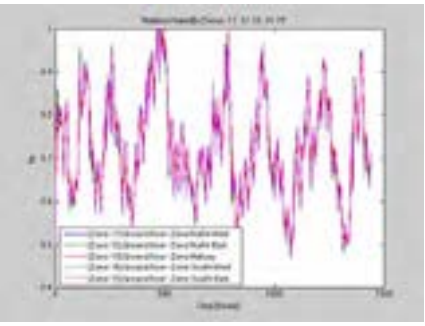




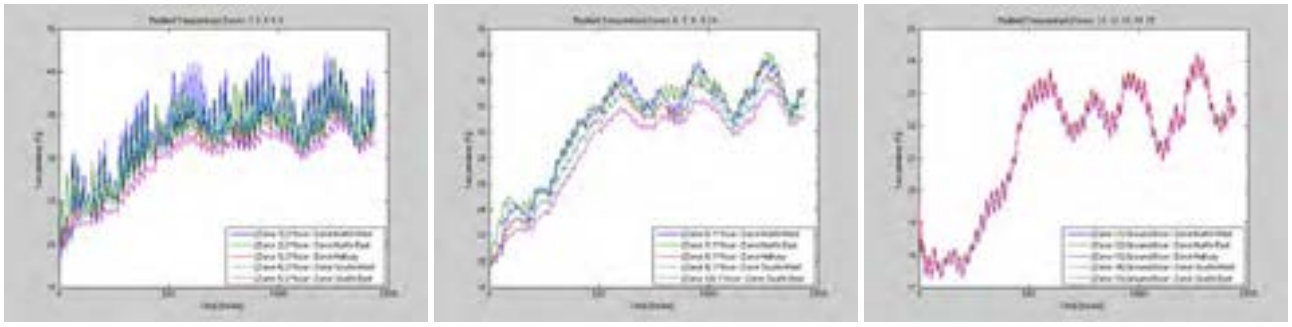
Umidità Relativa







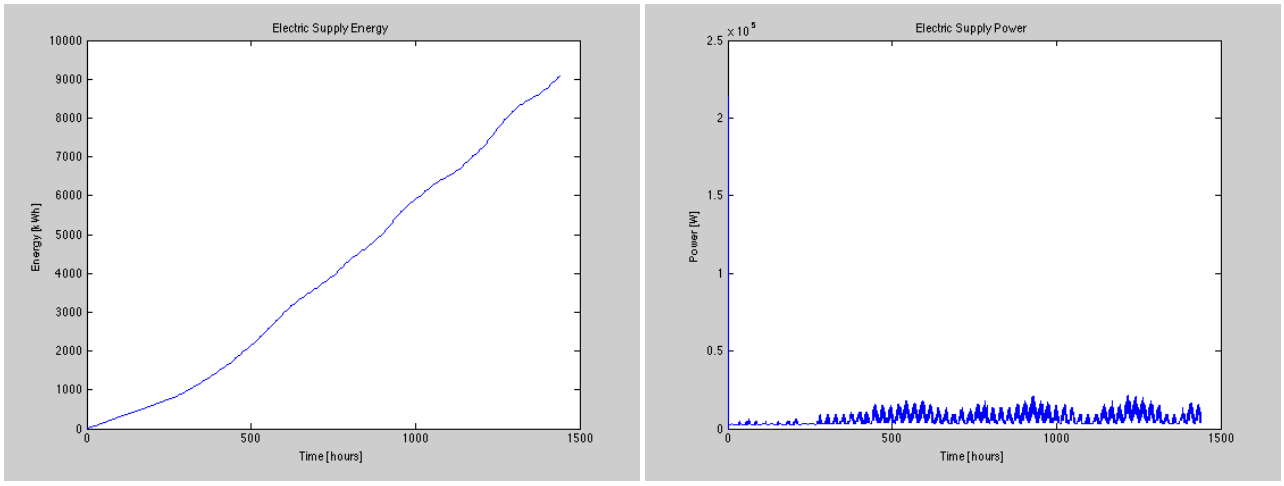
Temperatura media radiante delle pareti



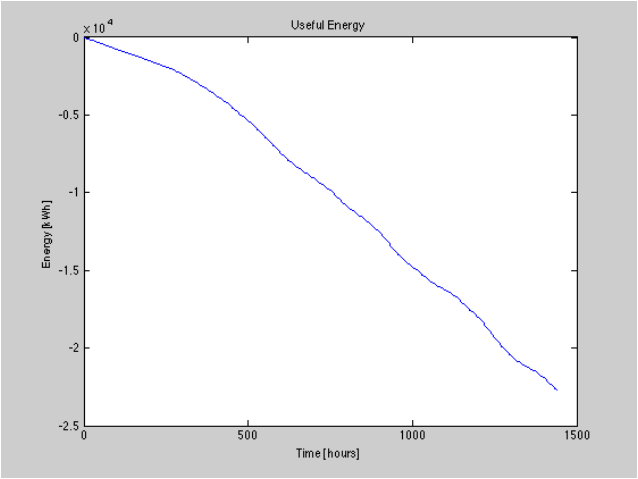
5.1.5 Simulazioni Ancona 60 giorni estivi termostato

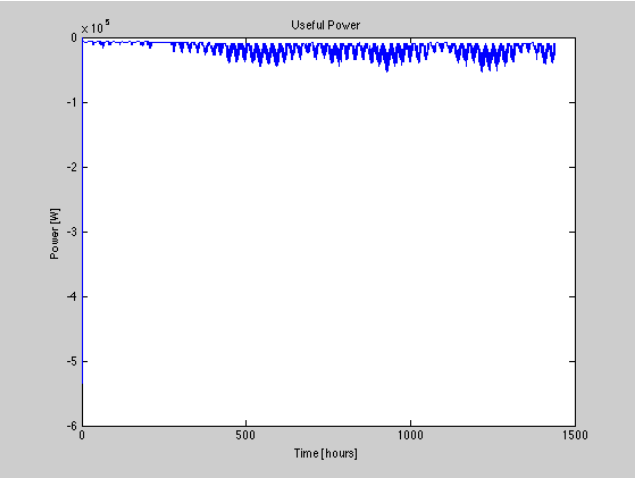
I risultati delle simulazioni per il periodo estivo (mesi di giugno e luglio) con termostato attivo mostrano il comportamento dell'edificio e del gruppo frigorifero nelle condizioni di clima temperato (inizio giugno) e caldo (da fine giugno per tutto luglio). Gli indicatori utili alla definizione degli indici di prestazione sono, questa volta legati all'energia utile sottratta agli ambienti da parte del fluido termovettore e al consumo di energia elettrica del gruppo frigorifero. Il funzionamento del termostato è già stato spiegato in precedenza (paragrafi 4.3.3, 4.3.9 e 5.1.2). L'andamento della temperatura interna dimostra che nel sistema simulato il gruppo frigorifero è in grado di mantenere la temperatura di setpoint (25°C) nelle condizioni di clima temperato; cosa che non avviene, nei giorni particolarmente caldi, in alcune zone del secondo piano (quelle esposte a ovest). Nel primo piano si riesce a mantenere sempre la temperatura di setpoint; il pianterreno, infine, risulta sempre al di sotto del setpoint di 25°C (come già dimostrato nel free running dell'edificio estivo) e quindi si ha una semplice modulazione della potenza sottratta dovuta alla sottrazione di calore da parte del fluido termovettore freddo che comunque circola nei ventilconvettori spenti.
L'andamento della temperatura interna ed il conseguente andamento della potenza utile sottratta in ogni zona si riflette in tutti gli altri parametri di funzionamento dell'impianto e ambientali: temperatura di ritorno dell'acqua di raffrescamento dalle singole zone e temperatura media di ritorno della stessa in centrale termica, temperatura di uscita dell'aria dai ventilconvettori di ciascuna zona, umidità relativa e temperatura media radiante delle pareti.
Infine, gli andamenti di temperatura evidenziano chiaramente i corridoi, che sono le zone non climatizzate.

Energia elettrica cumulata e potenza elettrica assorbita nel periodo di simulazione

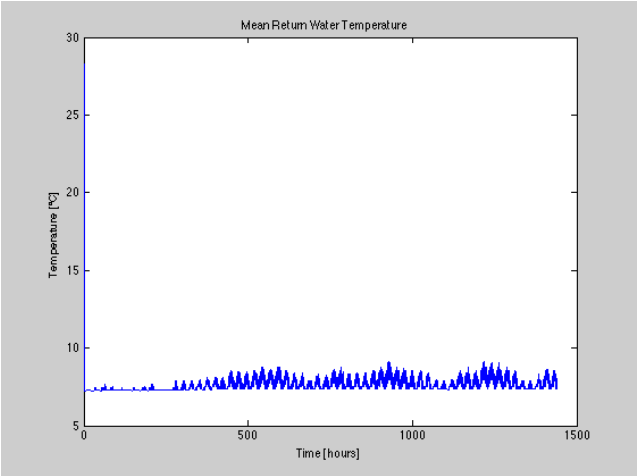


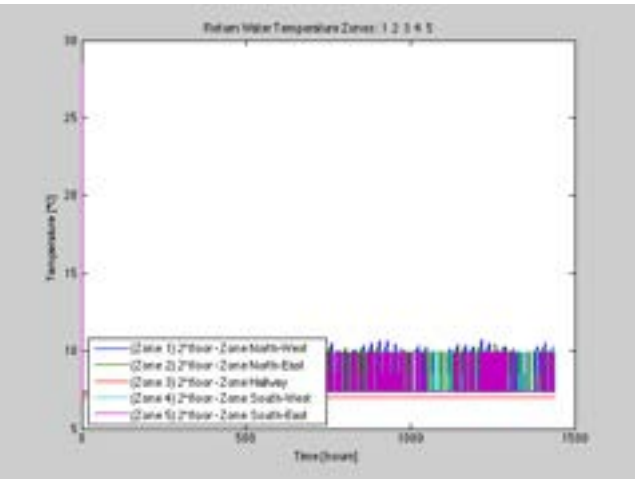
Energia utile cumulata e potenza utile sottratta dall'impianto di climatizzazione

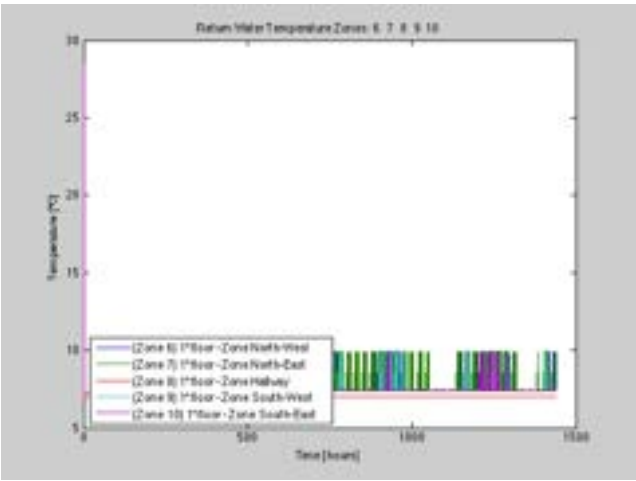


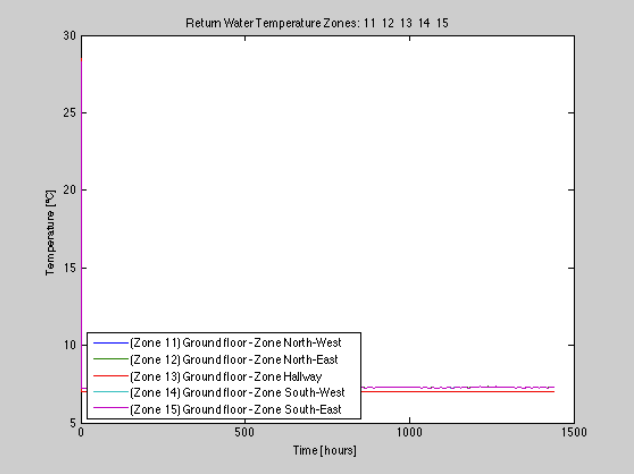


Temperatura media di ritorno dell'acqua in centrale frigorifera e temperatura di ritorno dalle singole zone

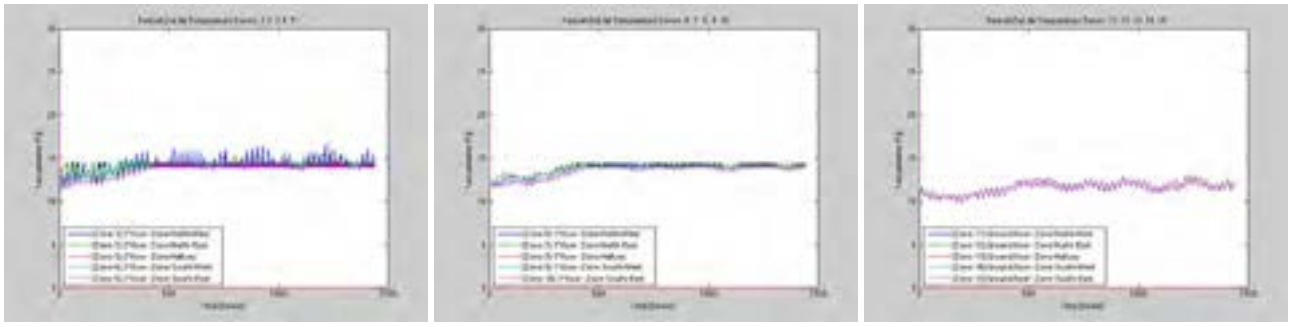




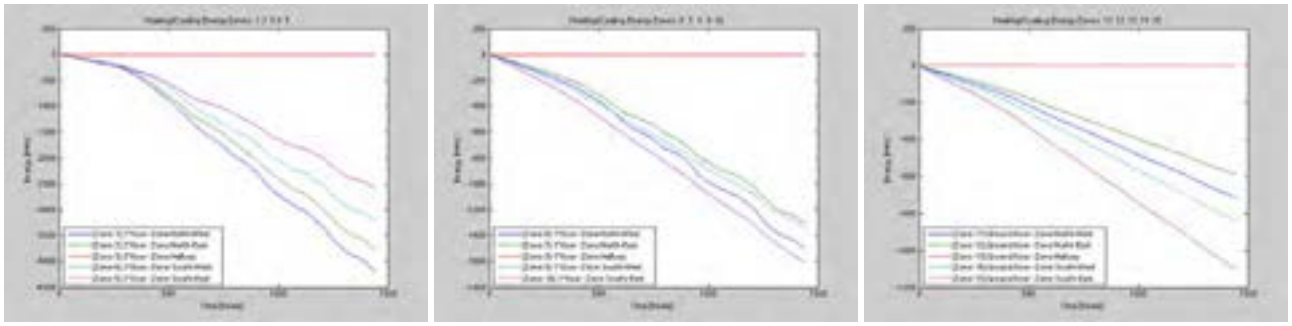




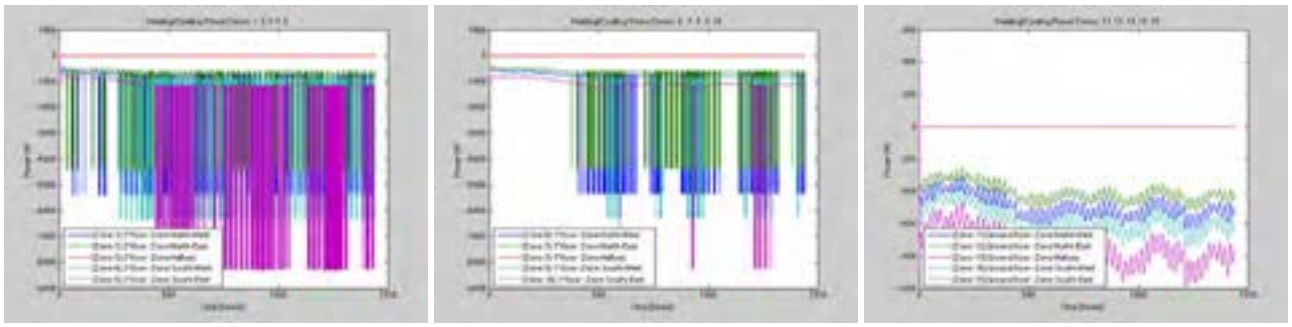
Temperatura di uscita dai ventilconvettori



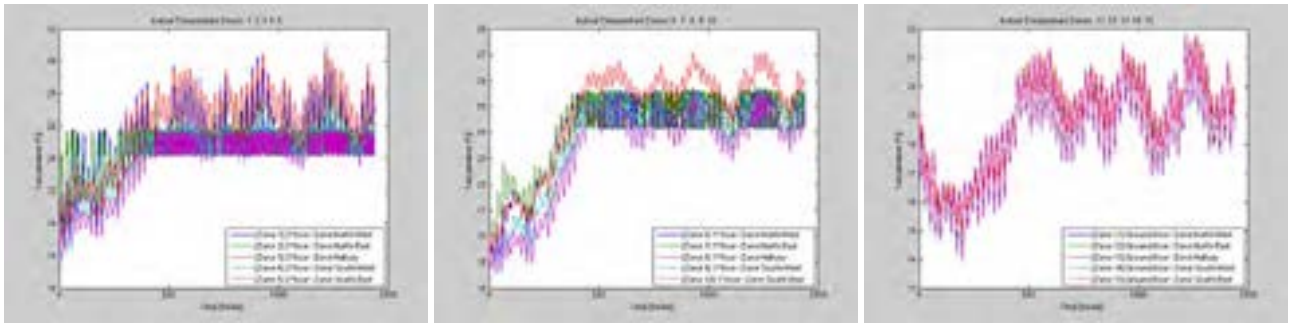
Energia termica sottratta dai terminali per ciascuna zona



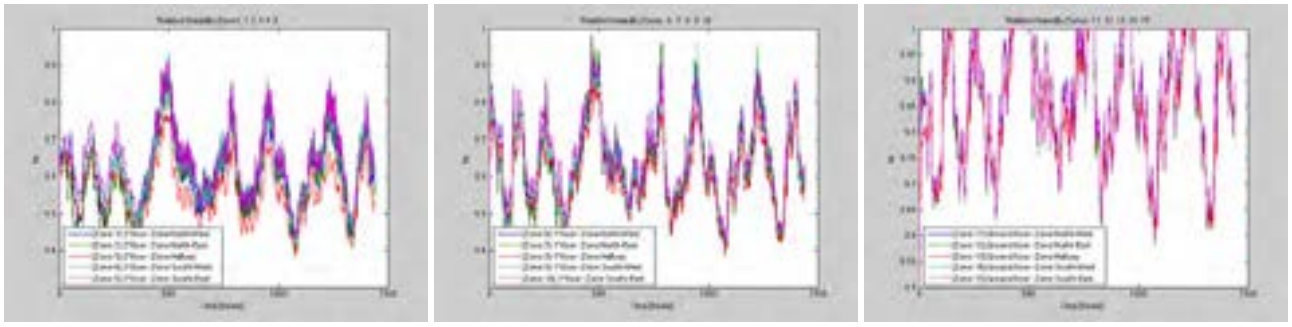
Potenza termica



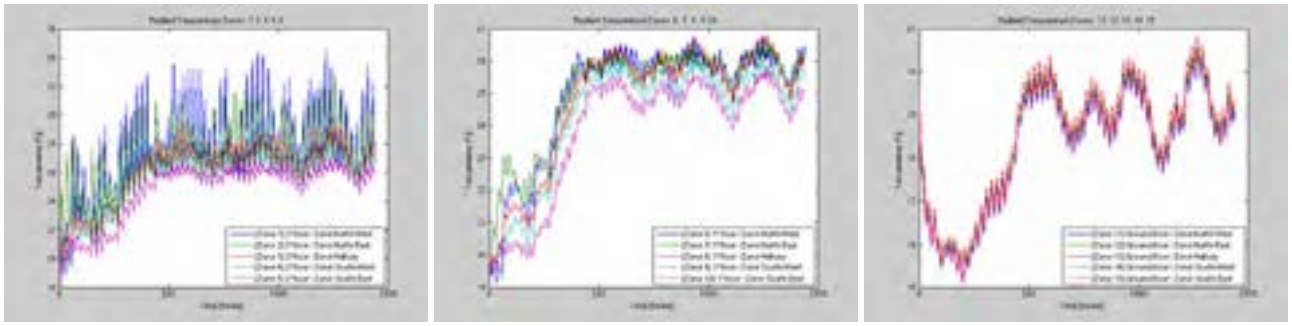
Temperatura interna



Umidità Relativa



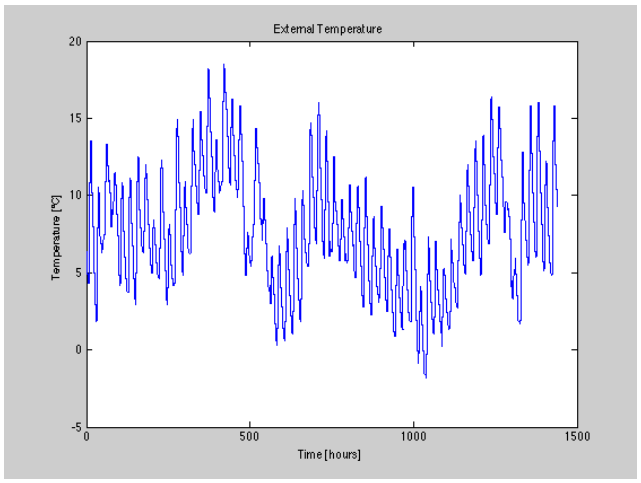
Temperatura media radiante delle pareti

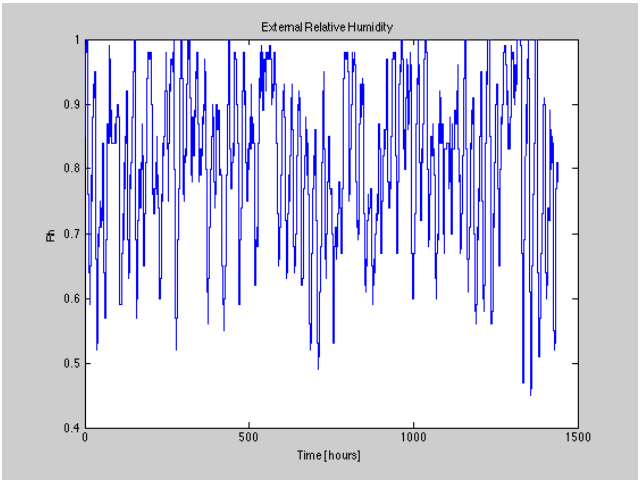


5.1.6 Simulazioni Roma 60 giorni invernali free running

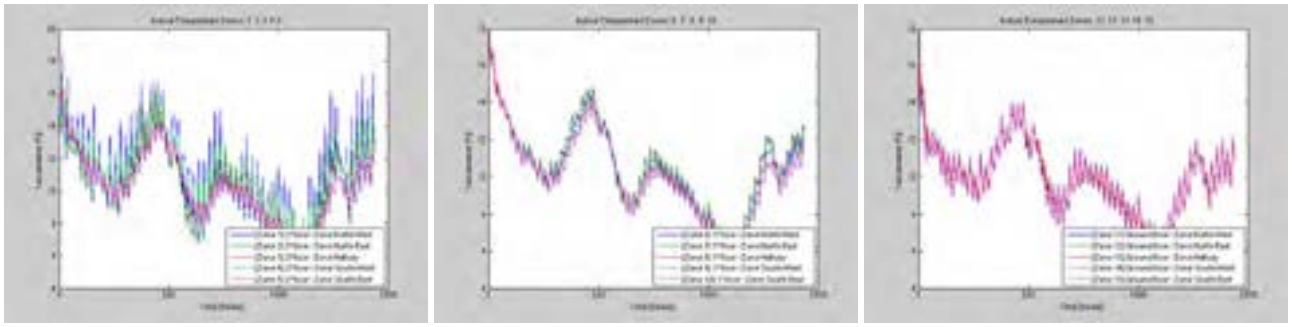
In questo paragrafo e nei successivi tre, vengono riportati i risultati delle simulazioni per il modello di edificio a 15 zone situato a Roma. L'obiettivo, come detto, è quello di dimostrare la possibilità di svolgere simulazioni in differenti località. E' importante tuttavia ribadire che il file meteo utilizzato nel modello può essere sostituito con un dataset di parametri reali proveniente da qualsiasi centralina meteorologica. Poiché il modello è esattamente uguale a quello descritto nei quattro paragrafi precedenti, i commenti e le considerazioni fatte per la località di Ancona sono estendibili alle simulazioni dell'edificio posto a Roma.

Dati climatici esterni

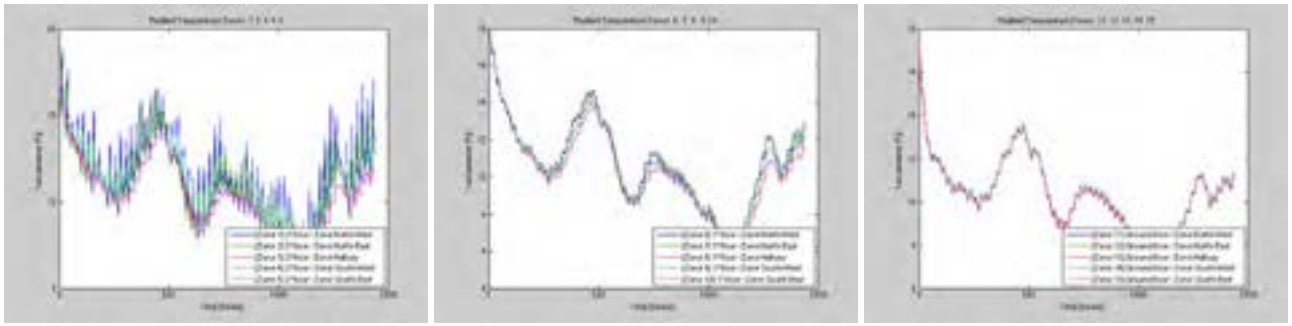




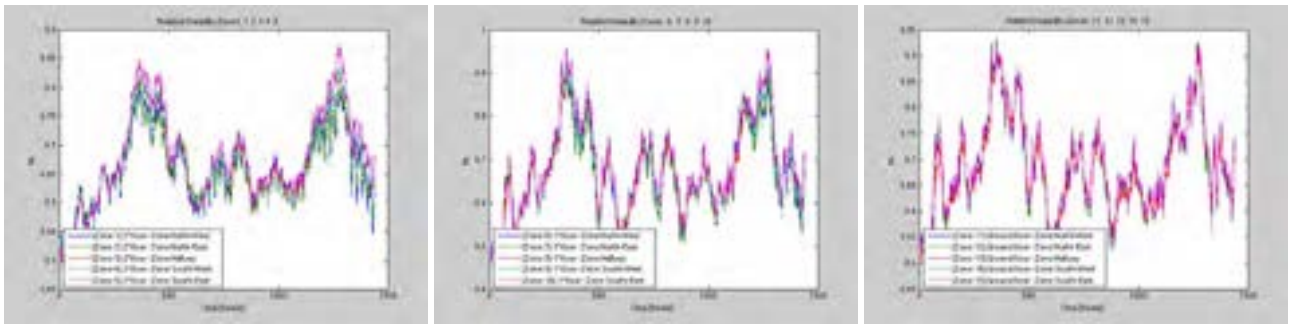
Temperatura interna



Temperatura media radiante delle pareti

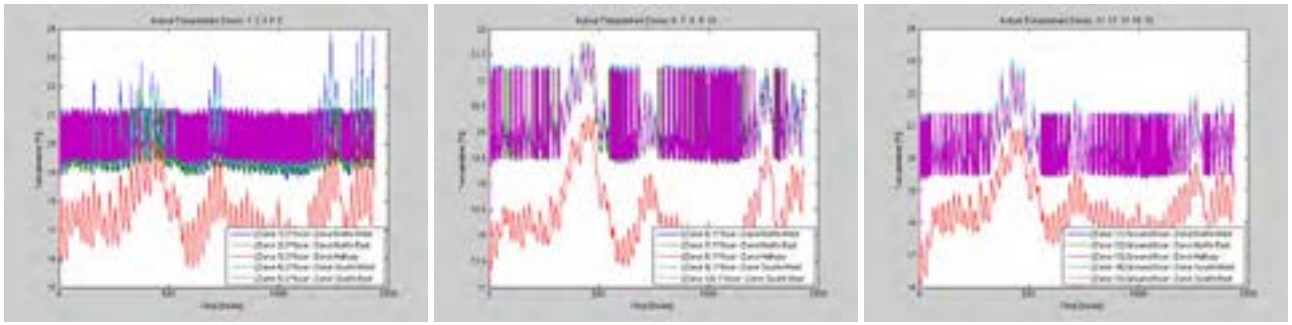


Umidità relativa

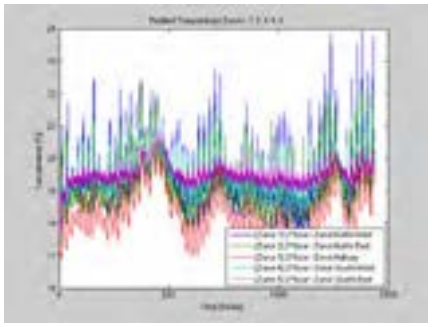
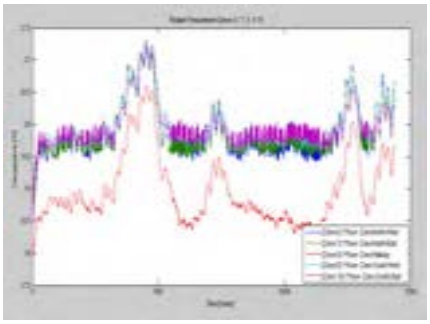


5.1.7 Simulazioni Roma 60 giorni invernali termostato

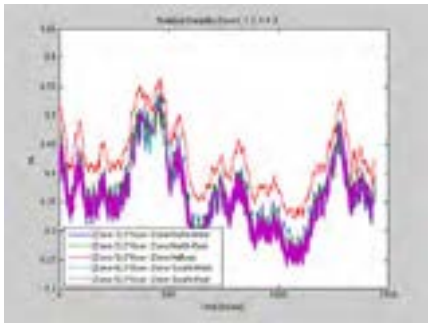
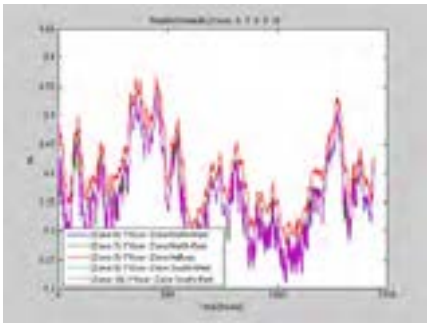
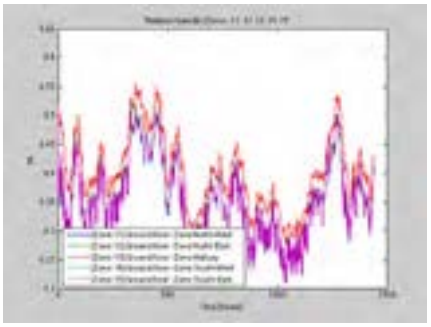
Temperatura interna



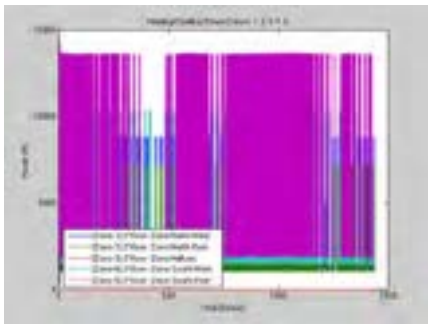
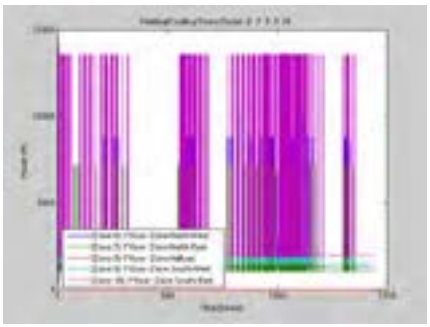
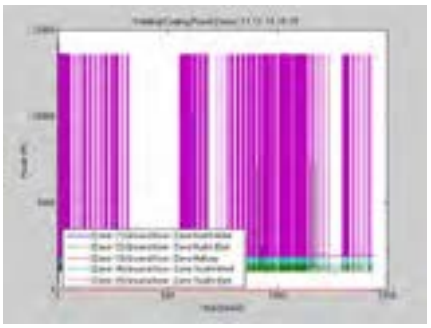
Temperatura media radiante delle pareti

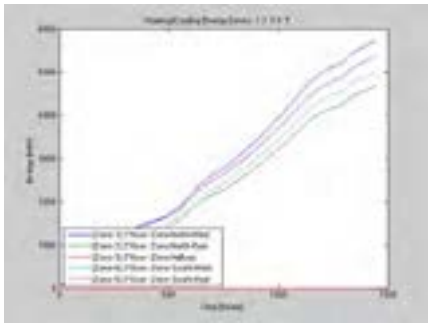
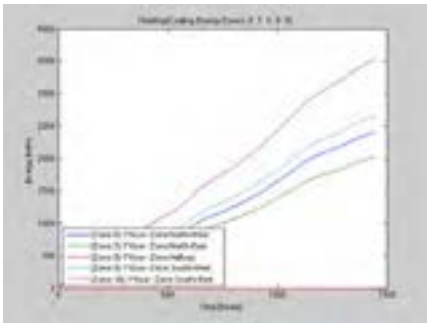
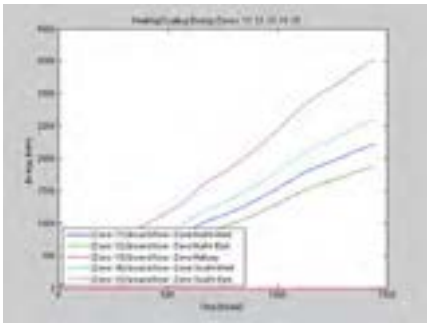
Umidità relativa

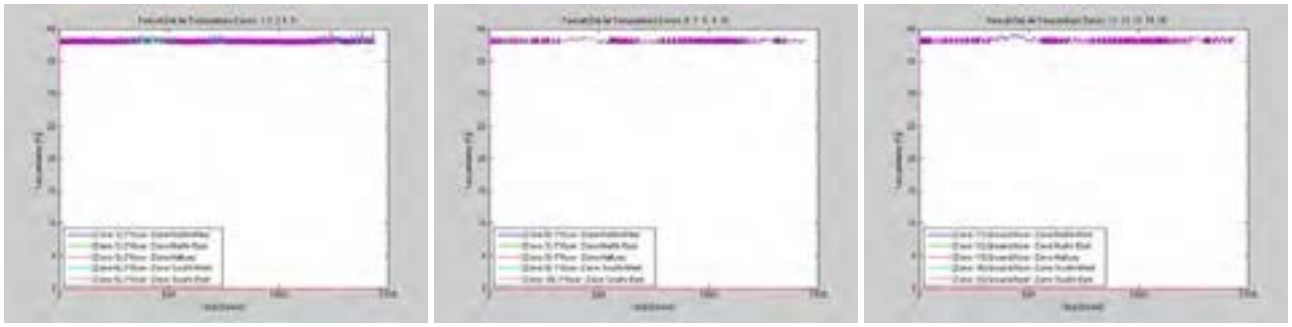
Potenza termica fornita

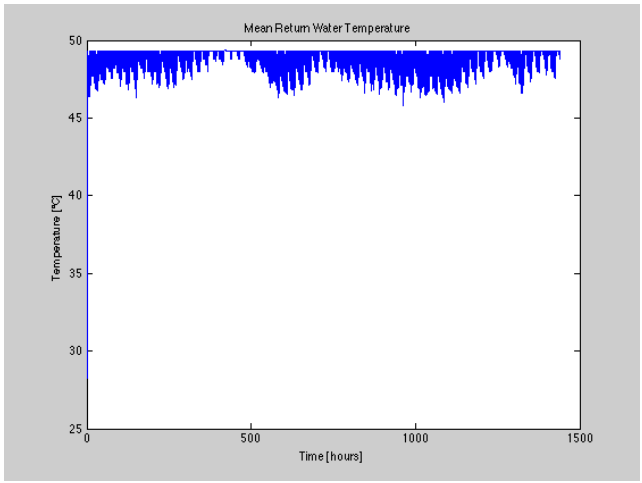
Energia termica fornita

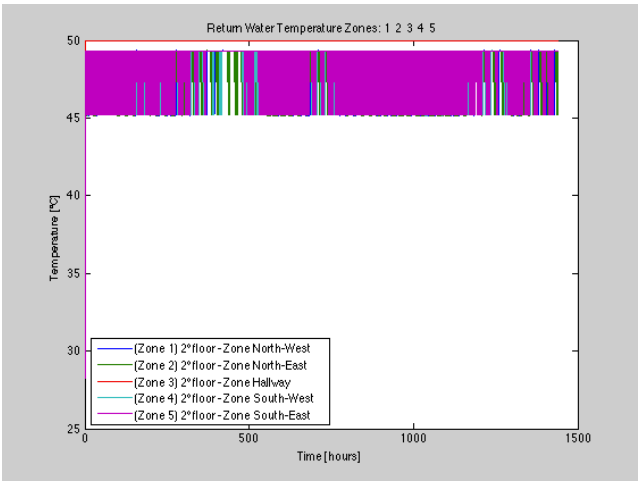




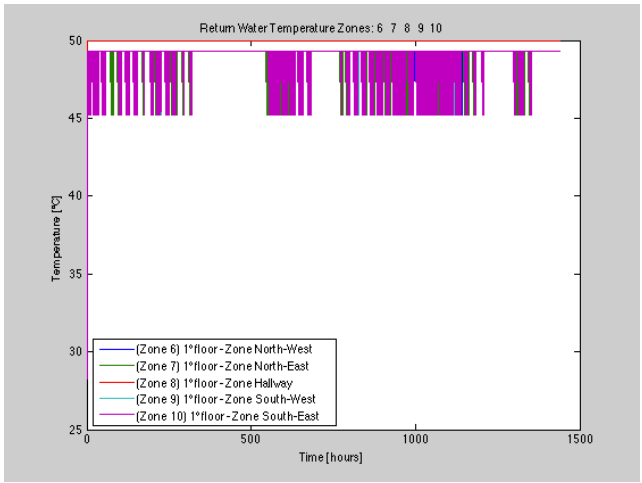
Temperatura di uscita dei ventilconvettori

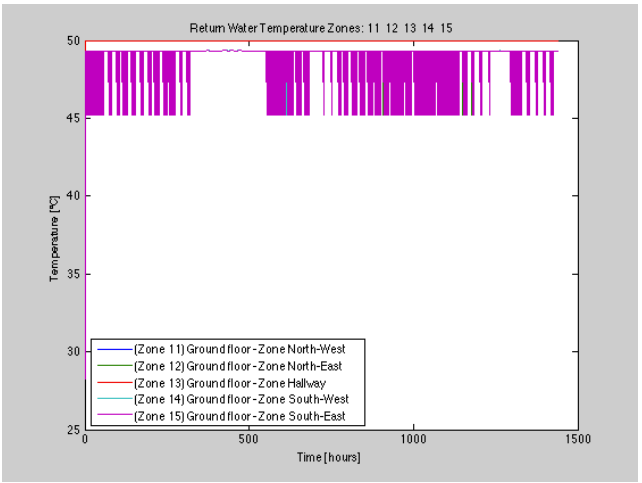


Temperatura media di ritorno dell'acqua in centrale termica e temperatura di ritorno dalle singole zone

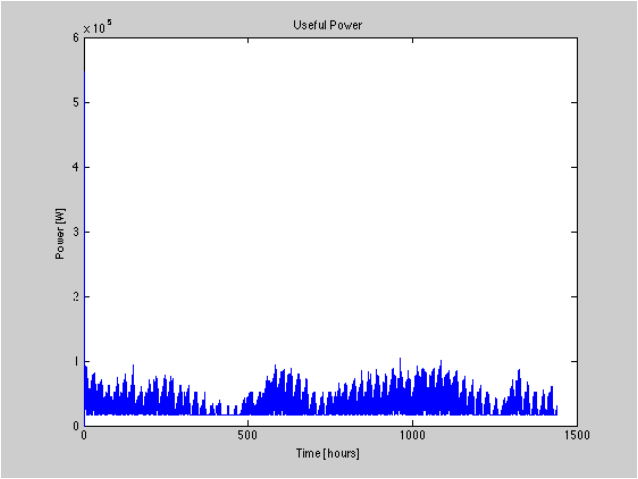


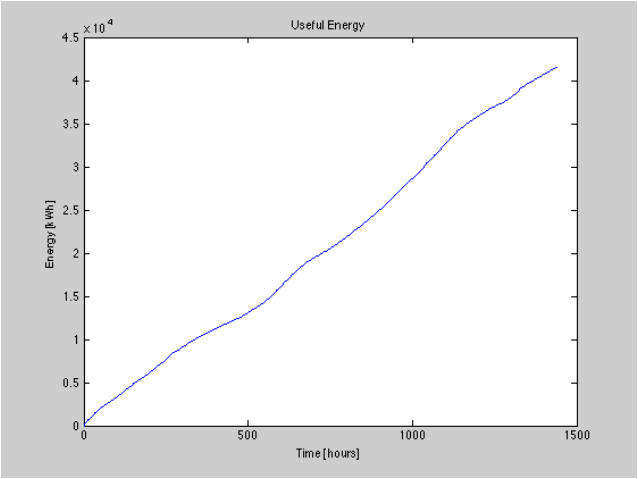




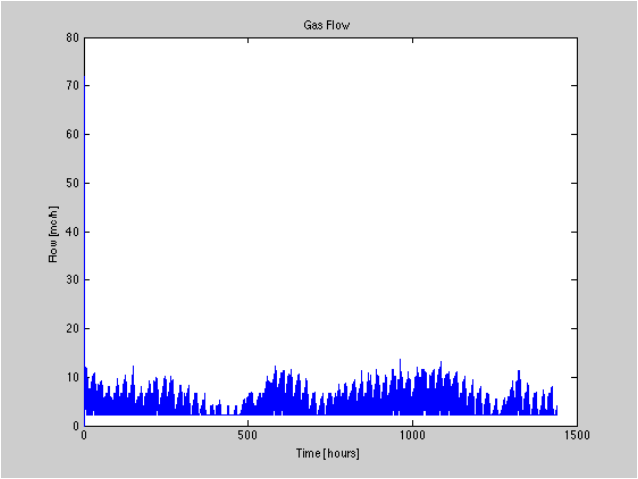


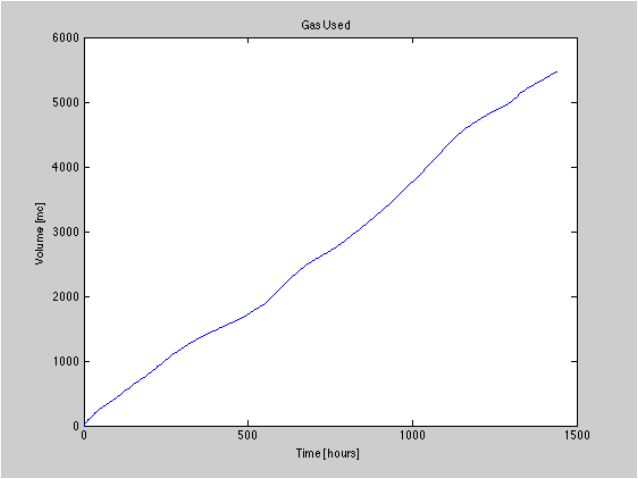
Potenza utile ed energia utile cumulata fornite all'edificio





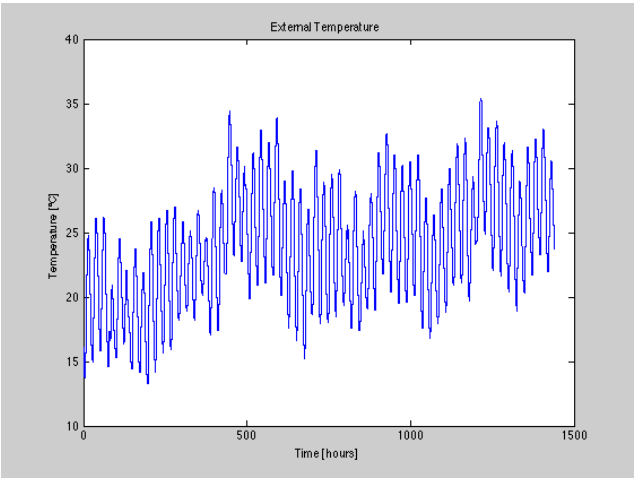
Portata oraria di gas naturale e consumo di gas naturale cumulato nel periodo di simulazione

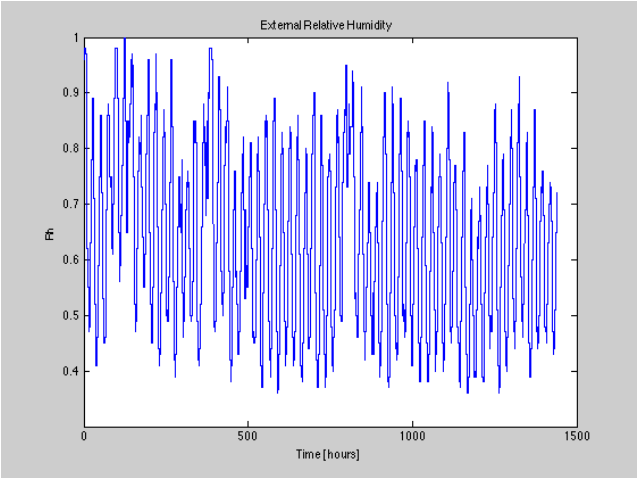




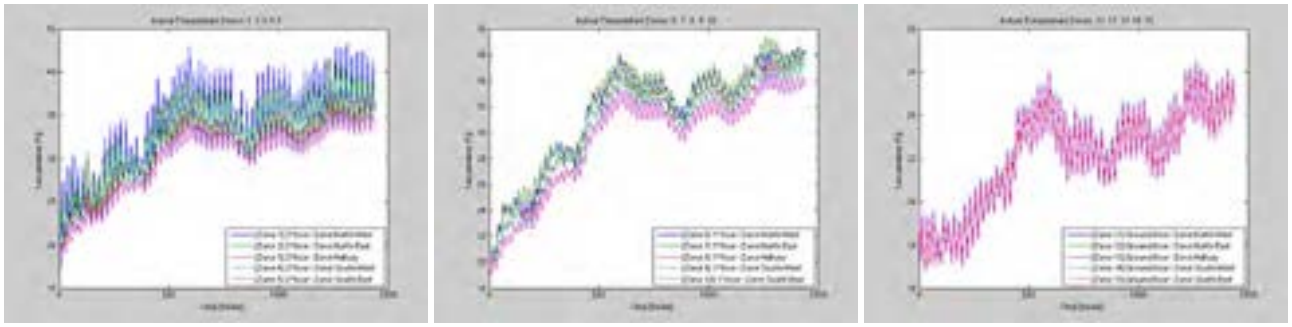
5.1.8 Simulazioni Roma 60 giorni estivi free running

Dati climatici esterni

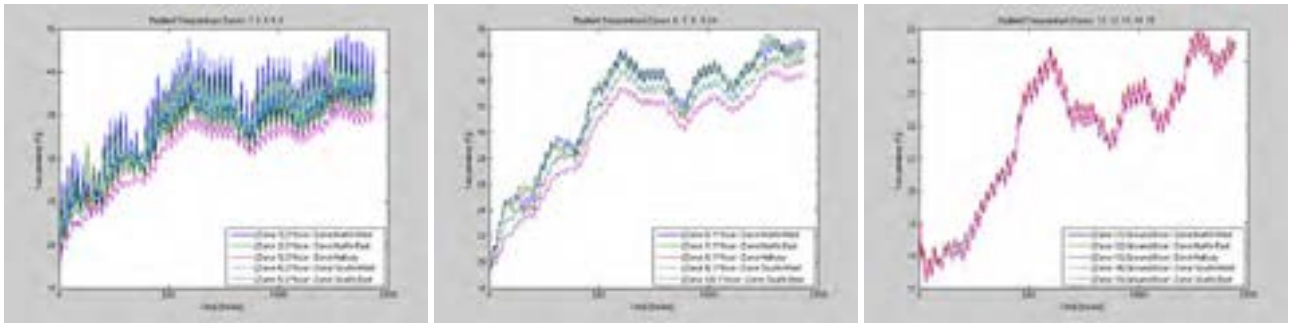




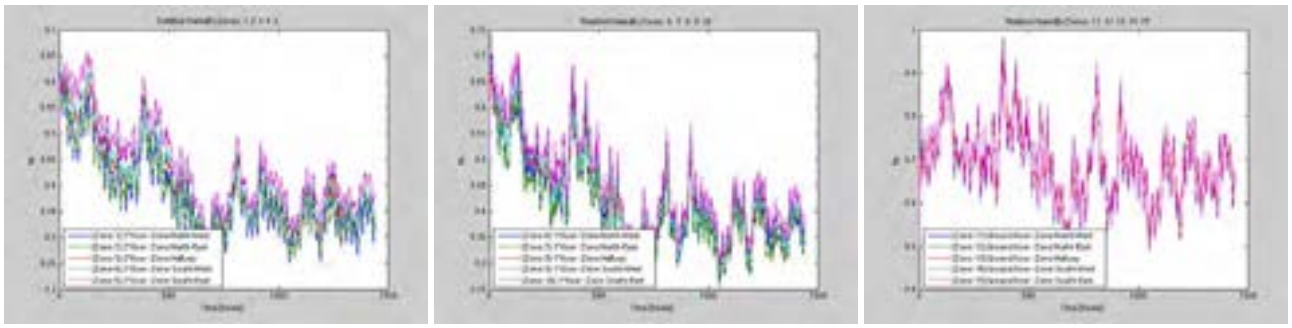
Temperatura interna



Temperatura media radiante delle pareti

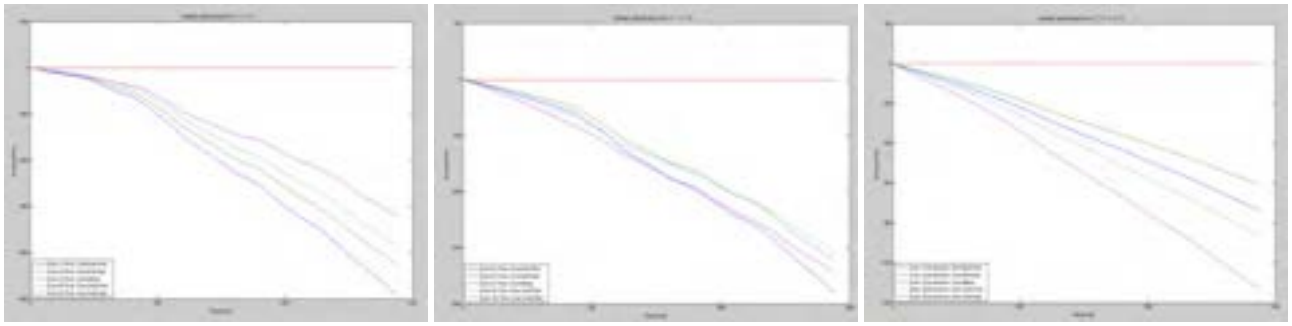


Umidità relativa

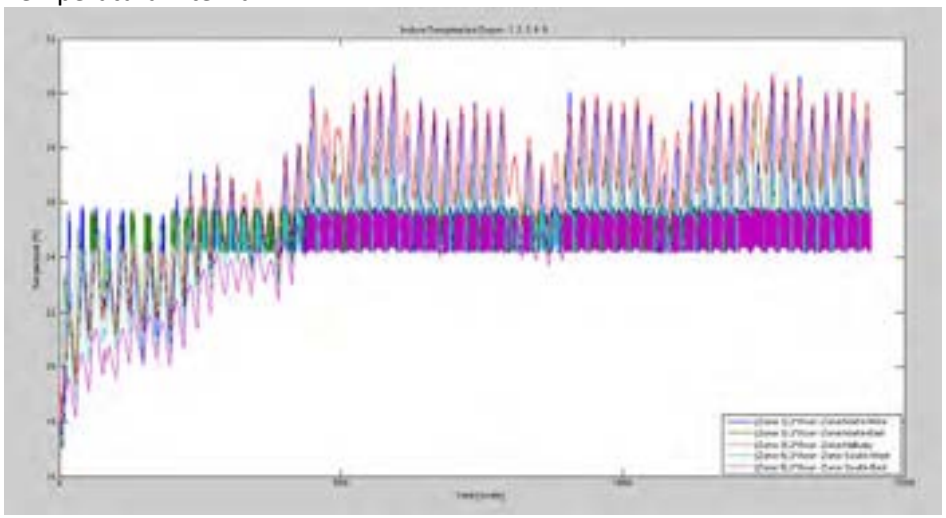


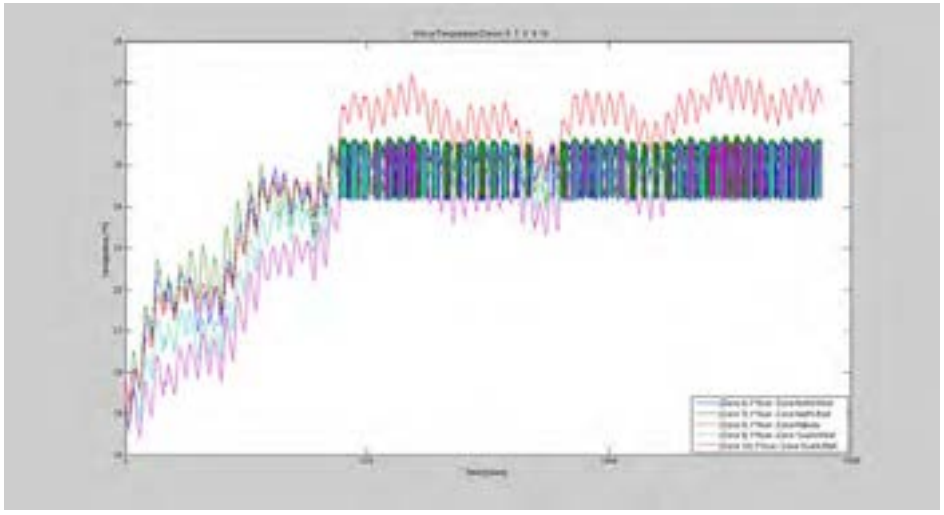
5.1.9 Simulazioni Roma 60 giorni estivi termostato

Energia termica utile sottratta in ciascuna zona

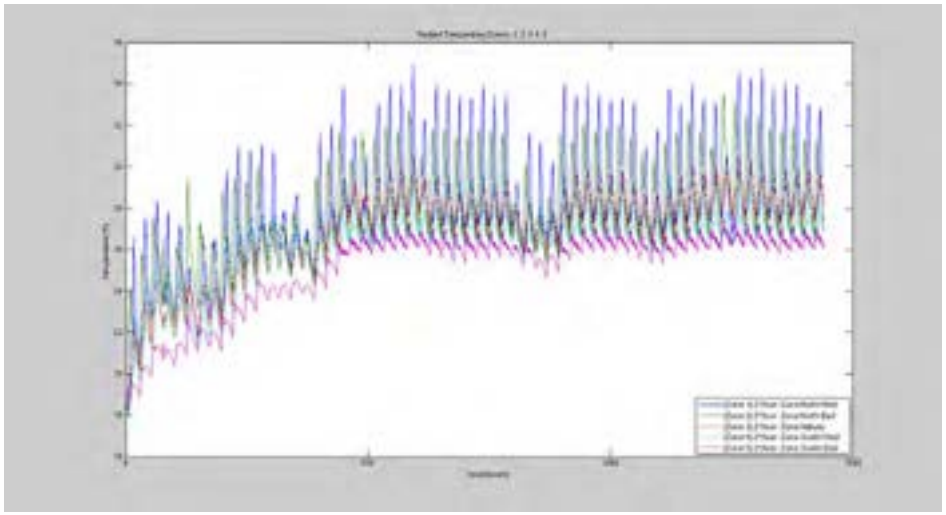


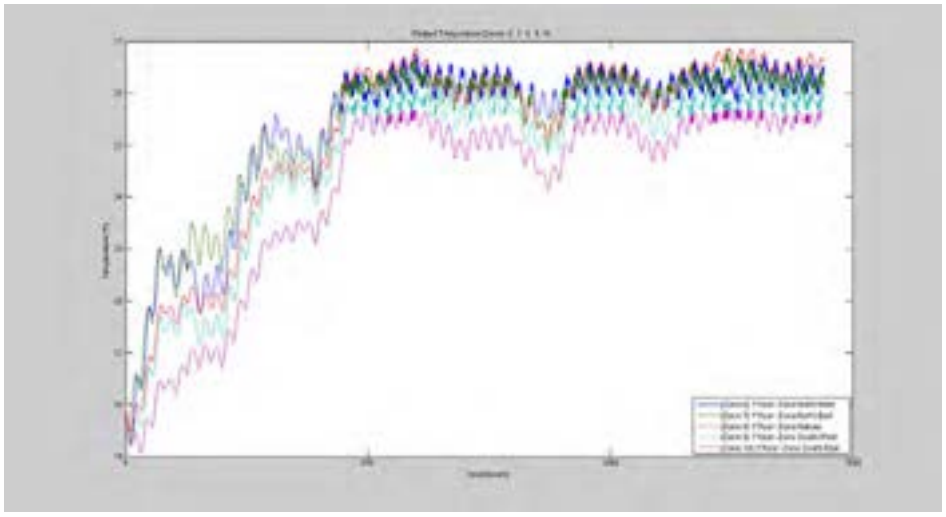
Temperatura interna



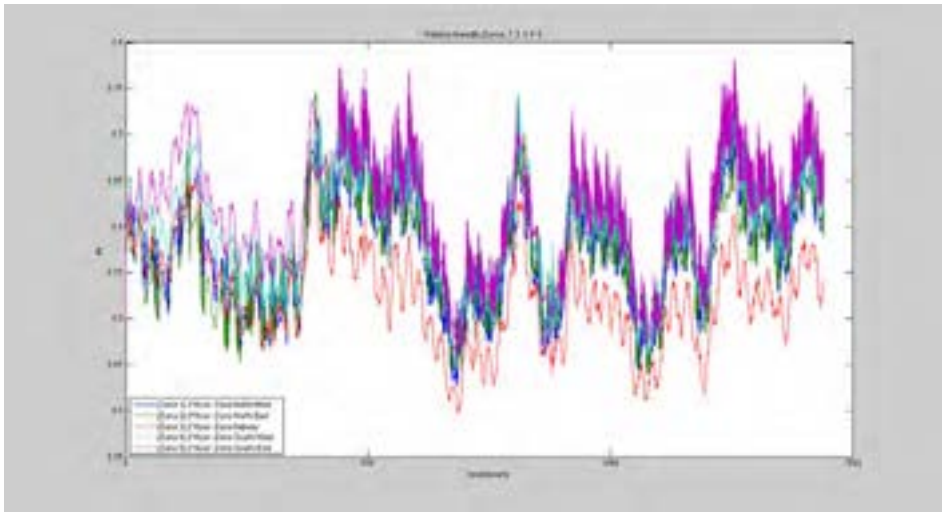


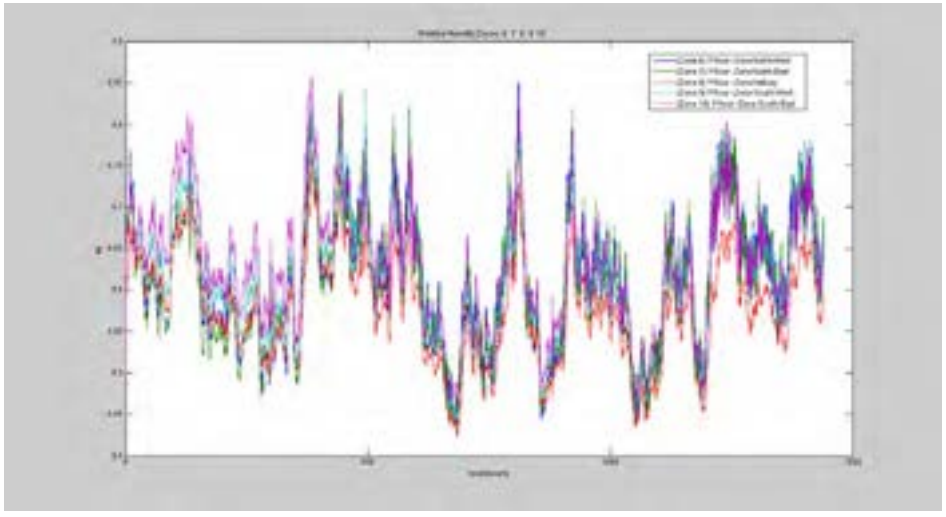
Temperatura media radiante delle pareti

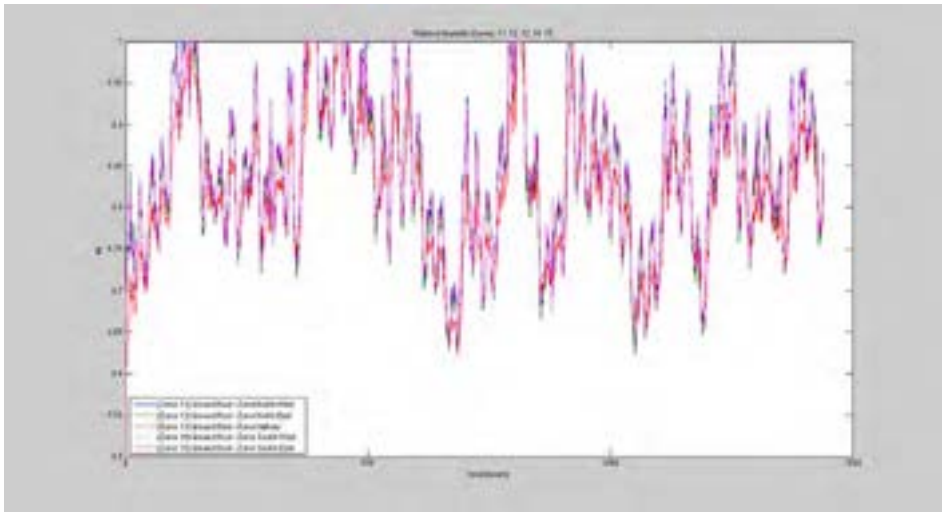




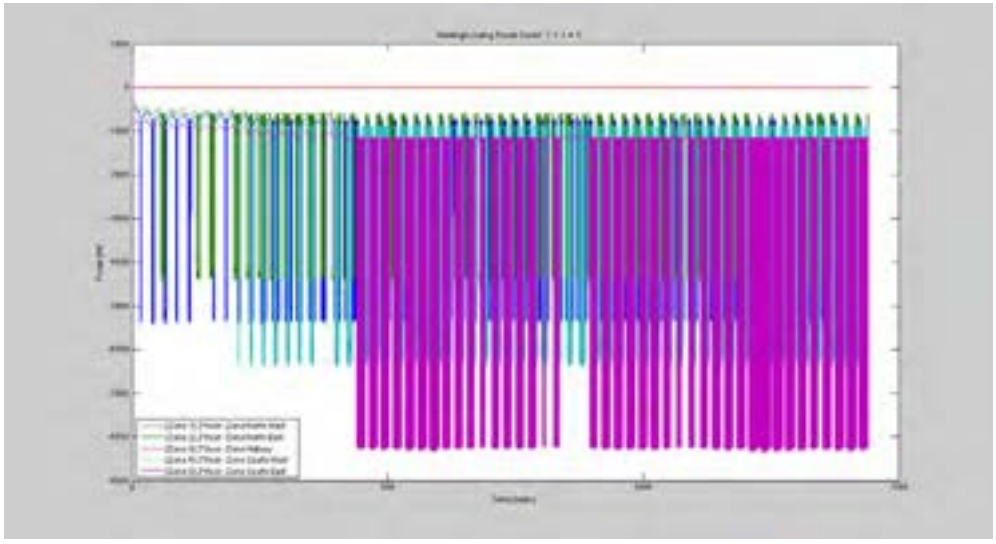
Umidità relativa

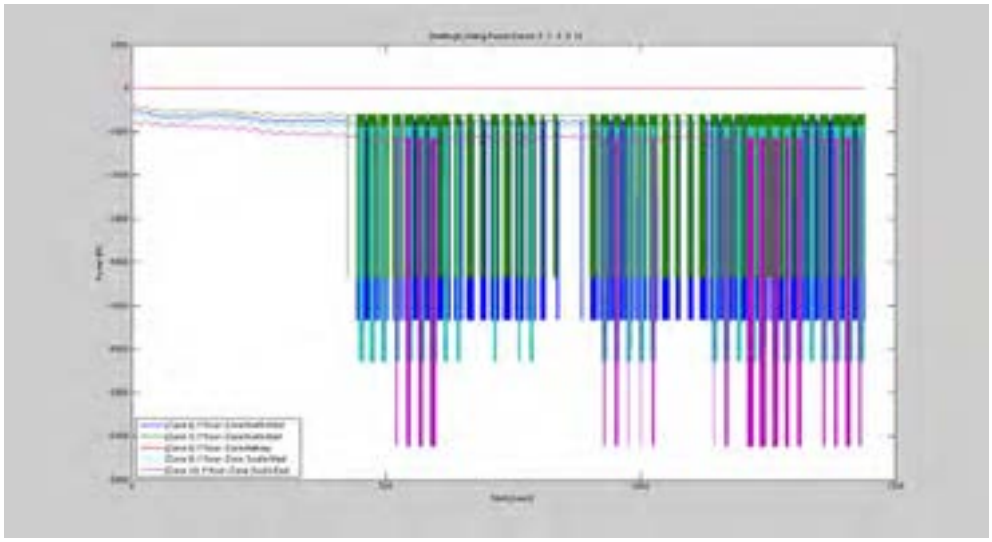


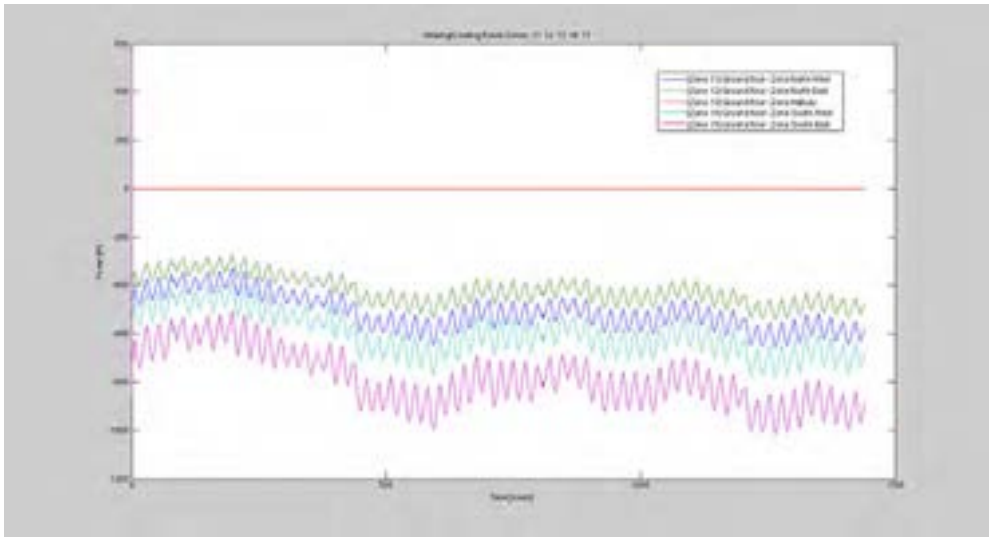




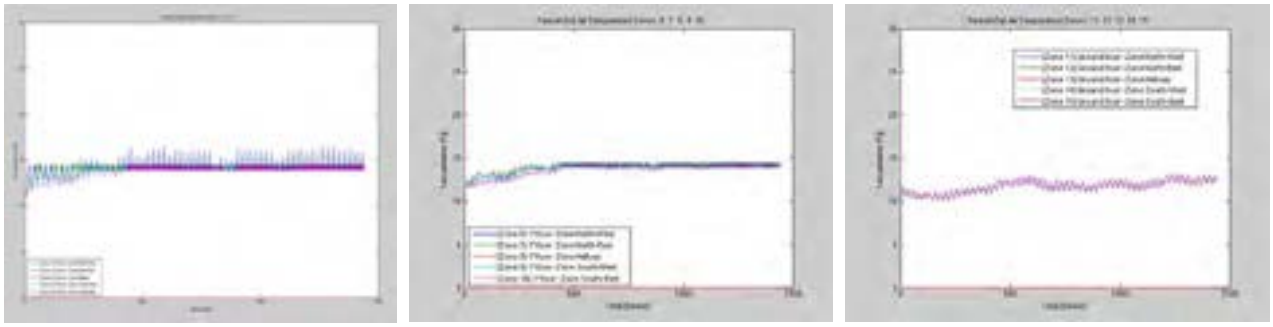
Potenza termica sottratta in ciascuna zona



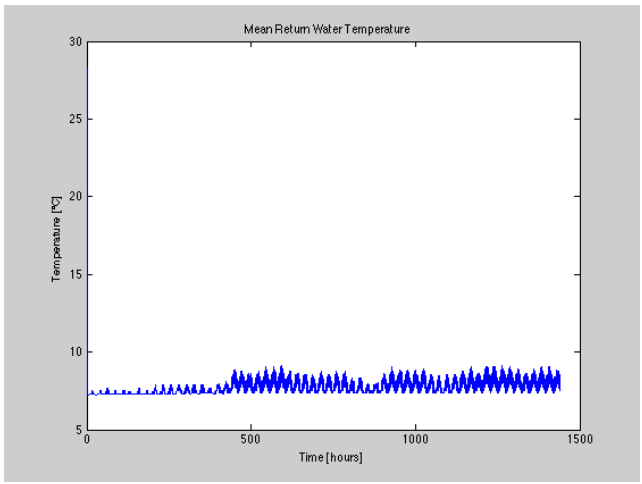


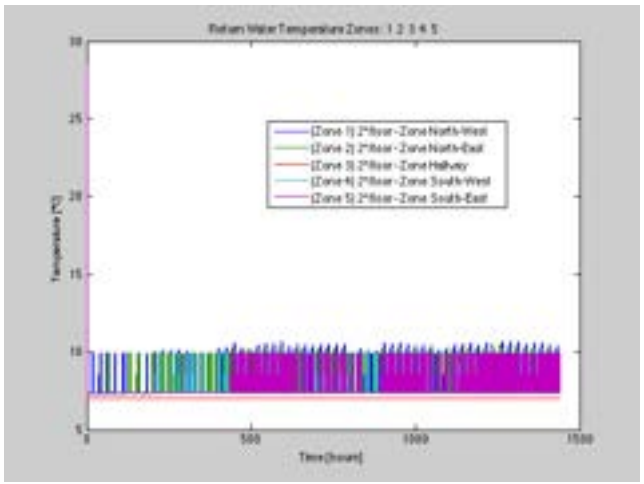


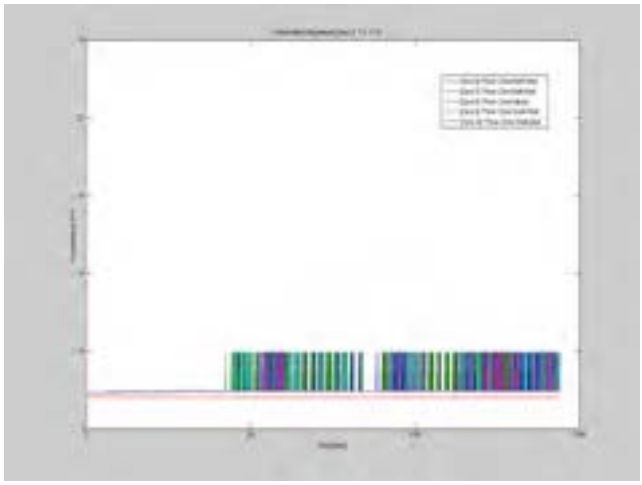
Temperatura di uscita dell'aria dal ventilconvettore

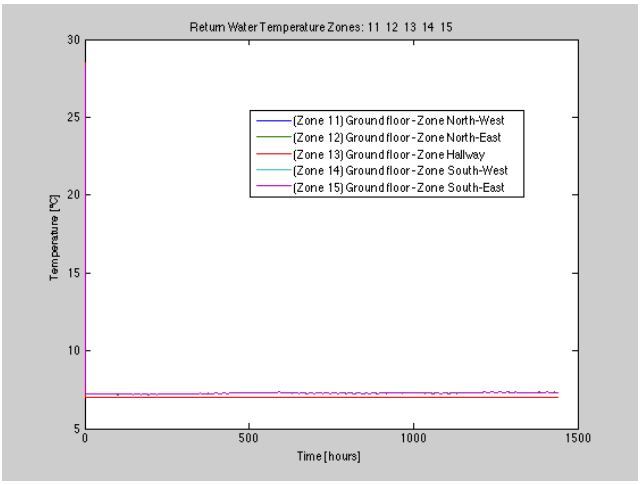


Temperatura media di ritorno dell'acqua in centrale termica e temperatura di ritorno dalle singole zone

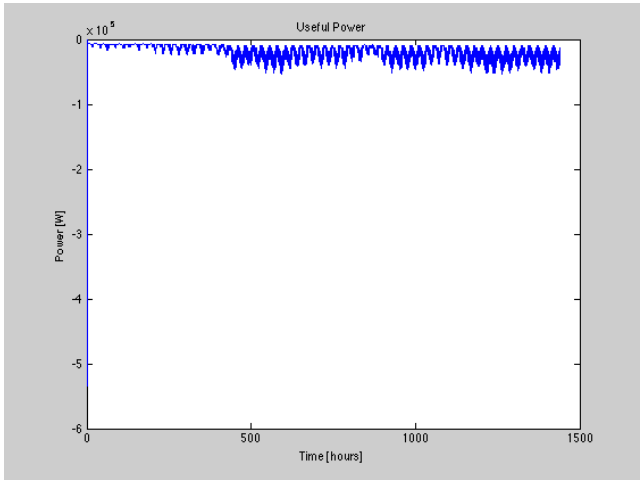


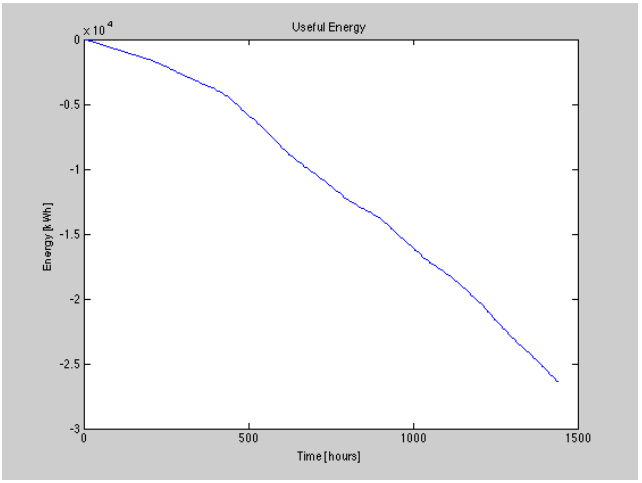




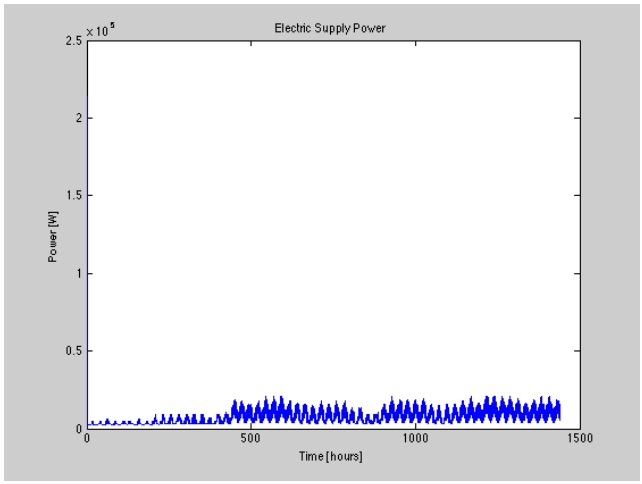


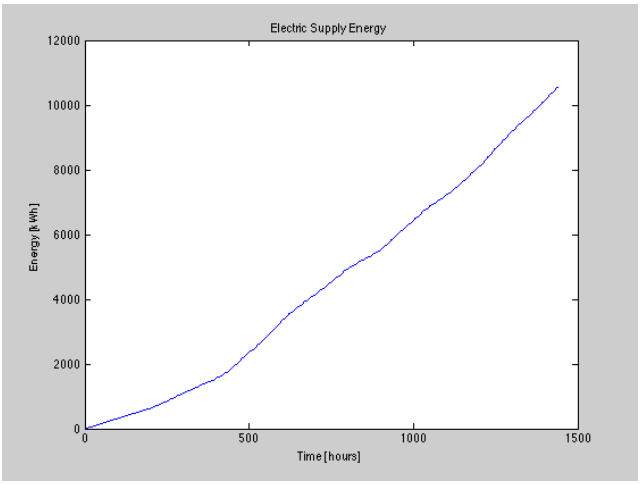
Potenza utile sottratta all'edificio ed energia utile sottratta cumulata





Potenza elettrica del gruppo frigorifero e consumo di energia elettrica

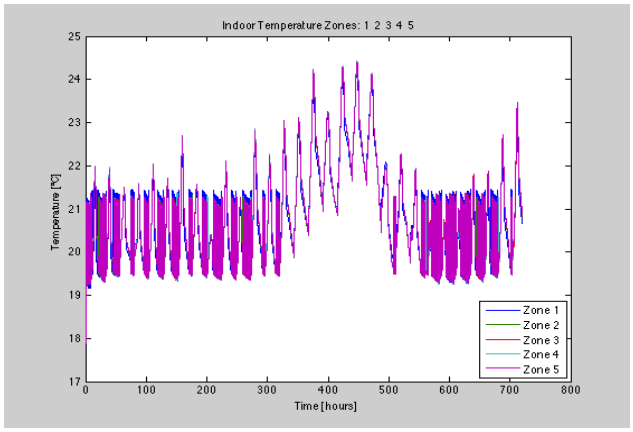


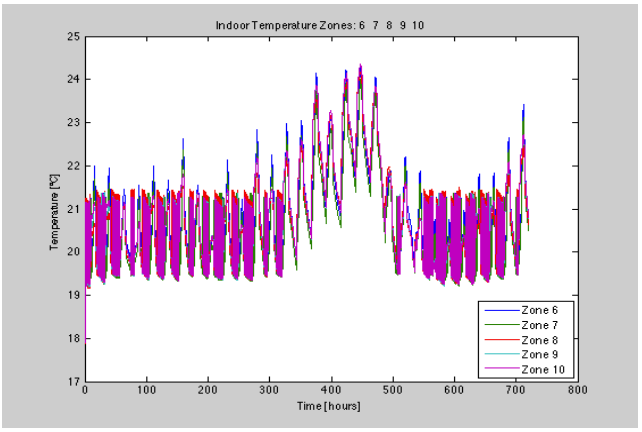


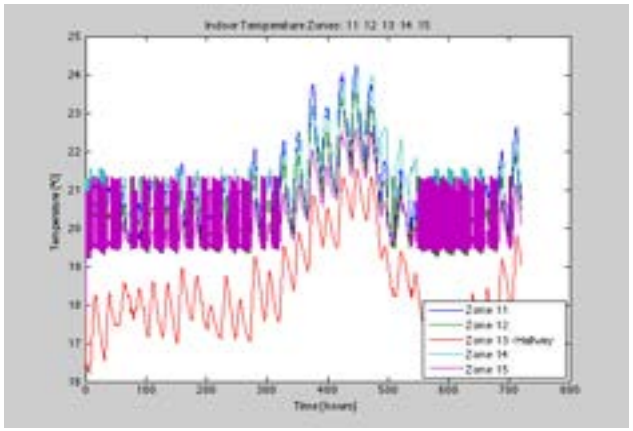
5.2 Risultati simulazioni per l'edificio a 57 zone

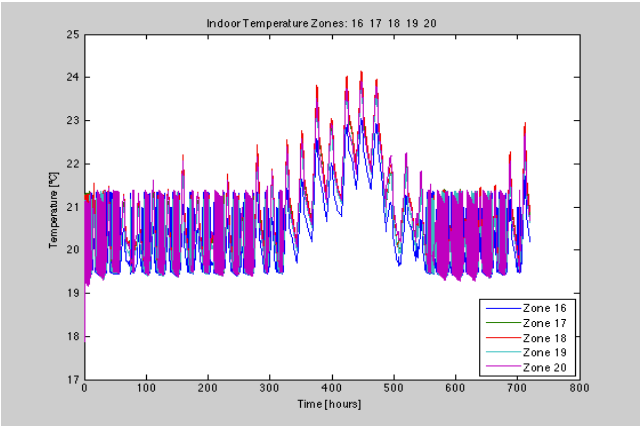
Come già anticipato nell'introduzione al capitolo, in questo paragrafo vengono presentati soltanto alcuni output dell'edificio a 57 zone riferiti alla stagione invernale (località Roma): temperatura dell'aria interna, umidità relativa e temperatura media radiante delle pareti. Il periodo simulato è di 30 giorni. I dati climatici esterni sono gli stessi (dei primi trenta giorni) presentati nel paragrafo 5.1.6. Come spiegato nel capitolo 4, per simulare l'edificio a 57 zone è stato sufficiente sostituire il file di configurazione dell'edificio ".bas" nel modello. Come intuibile, il livello di dettaglio fornito dalla simulazione a 57 zone è molto più elevato rispetto al modello a 15 zone, in cui molte stanze sono state aggregate tra loro. Questo implica la possibilità, qualora fosse possibile (come nell'edificio F40 reale), di simulare strategie di controllo molto più puntuali su ciascuna zona. Poiché il resto del modello (primi 30 giorni del periodo di simulazione, parametri impostati, dati climatici) è lo stesso, non vengono riportati i dati aggregati di consumo di gas naturale, in quanto risultano essere gli stessi del modello a 15 zone.

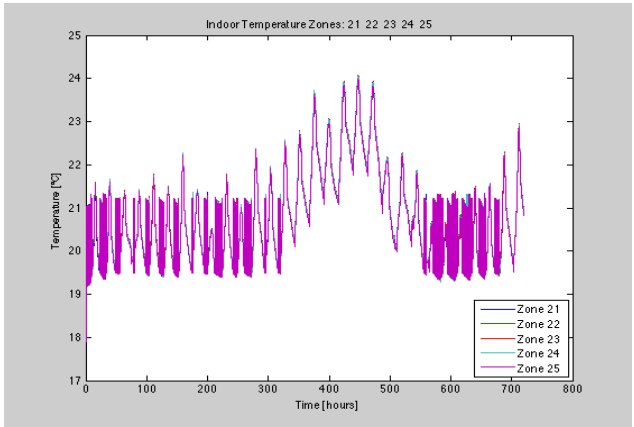
Temperatura interna

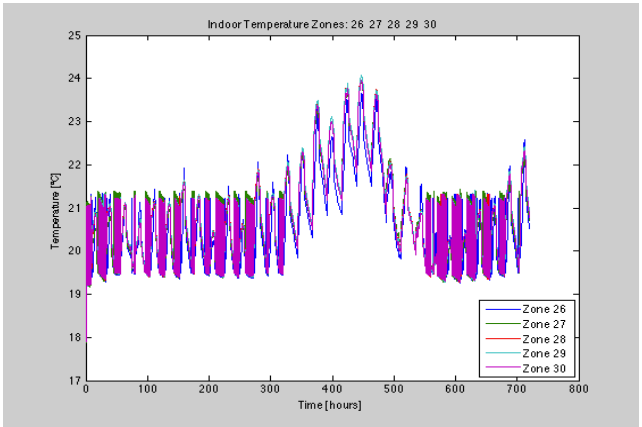


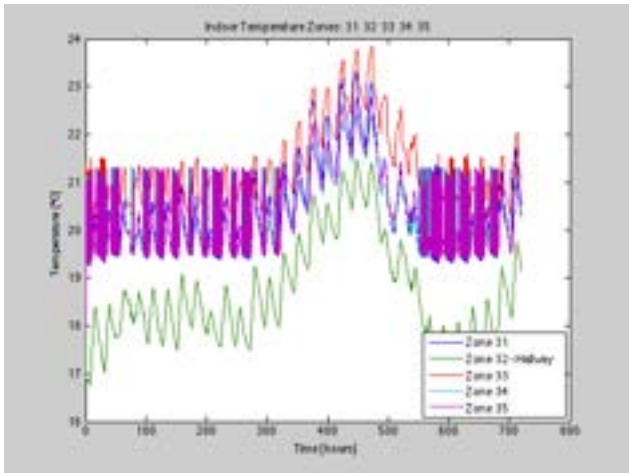


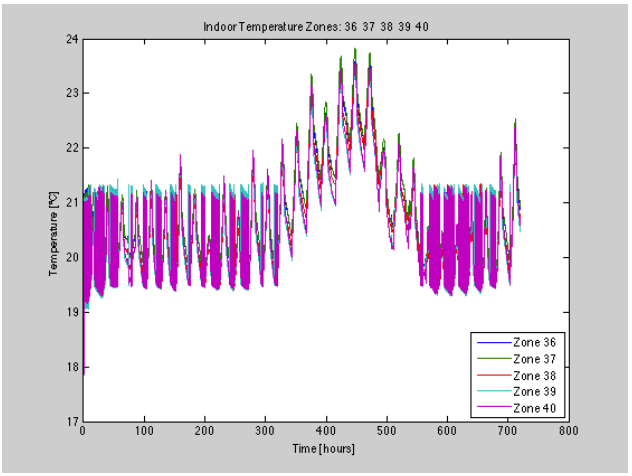


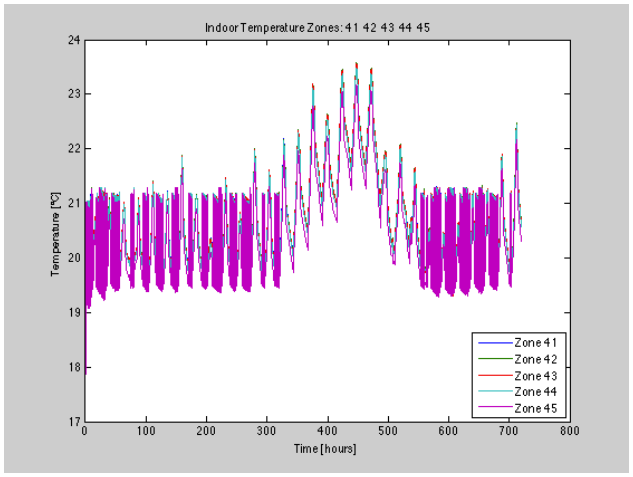


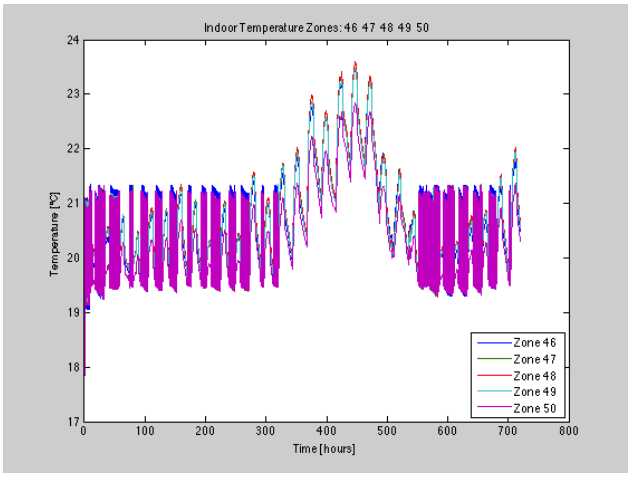


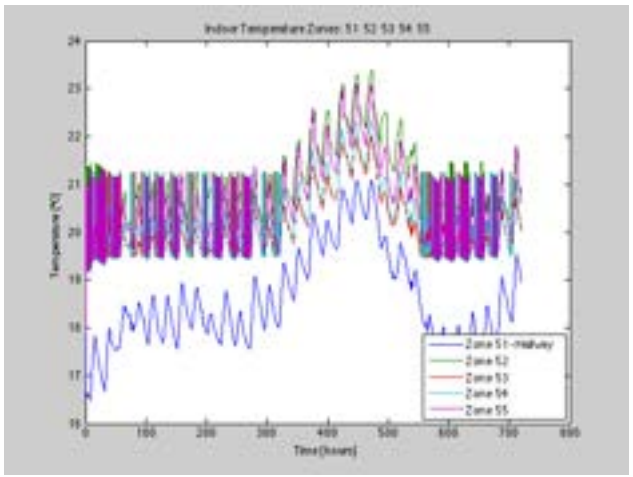


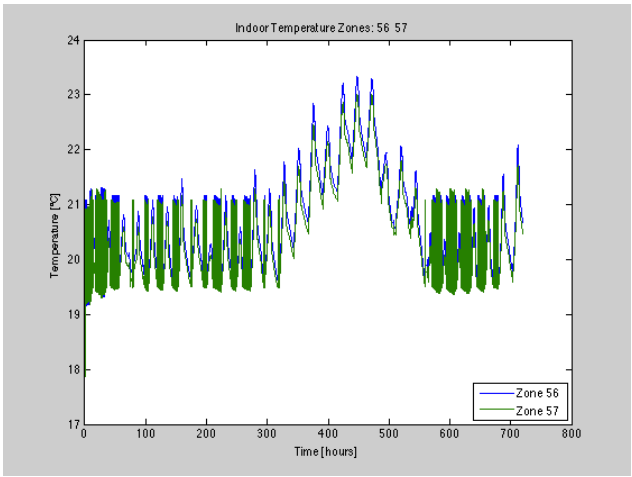

Indoor Temperature Zones: 31 32 33 34 35
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 31
Zone 32 - Hallway
Zone 33
Zone 34
Zone 35


Indoor Temperature Zones: 36 37 38 39 40
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 36
Zone 37
Zone 38
Zone 39
Zone 40

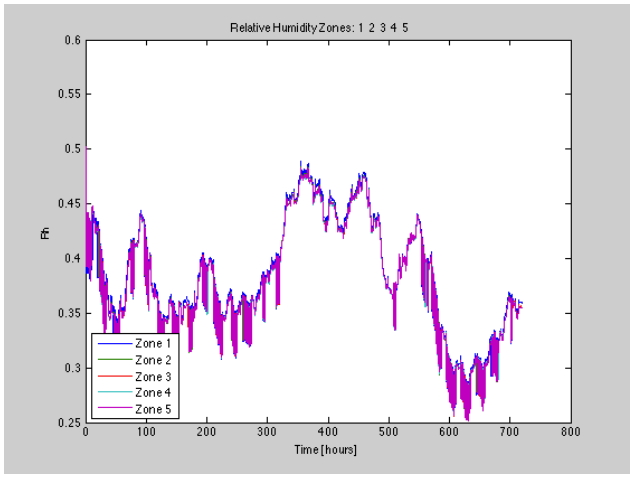

Indoor Temperature Zones: 41 42 43 44 45
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 41
Zone 42
Zone 43
Zone 44
Zone 45

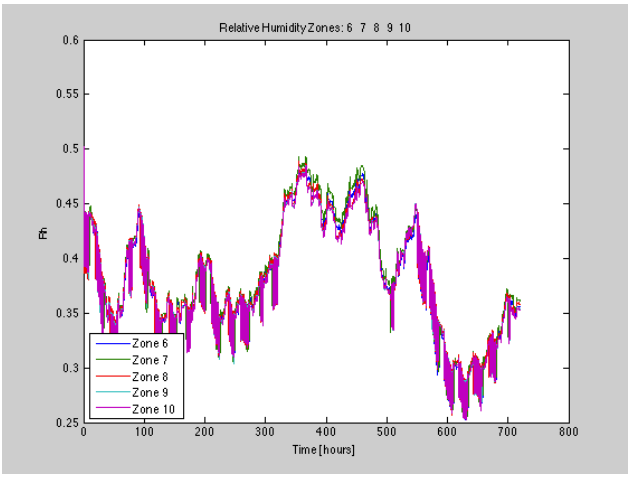

Indoor Temperature Zones: 46 47 48 49 50
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 46
Zone 47
Zone 48
Zone 49
Zone 50

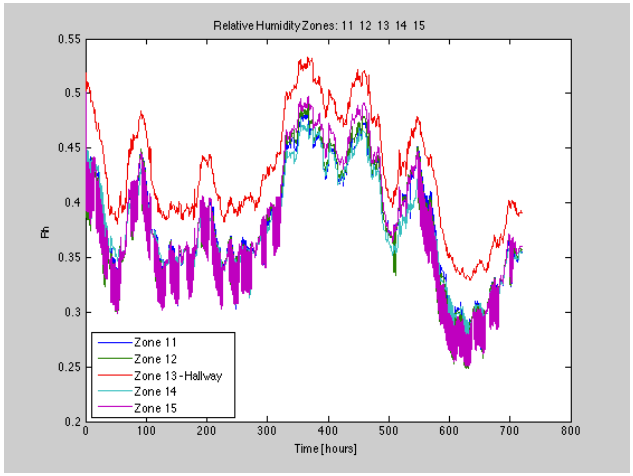

Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 51 - Hallway
Zone 52
Zone 53
Zone 54
Zone 55

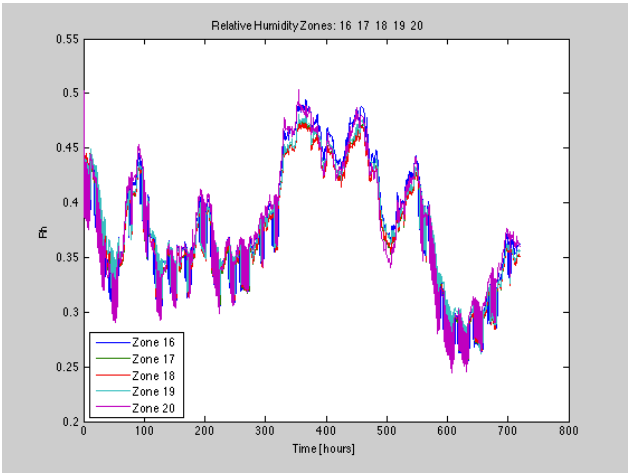

Indoor Temperature Zones: 56 57
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 56
Zone 57

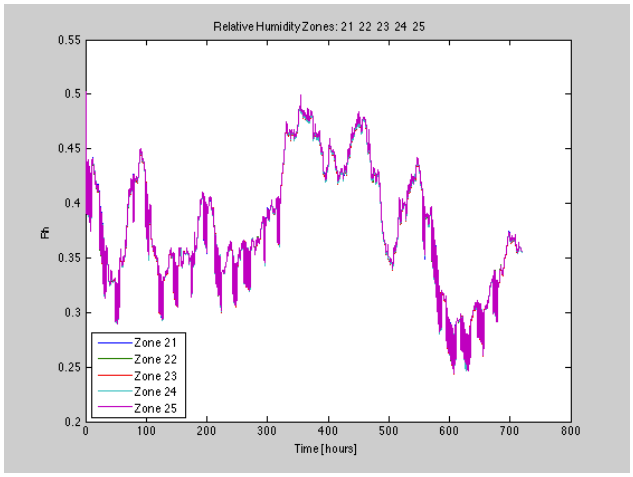
Umidità relativa

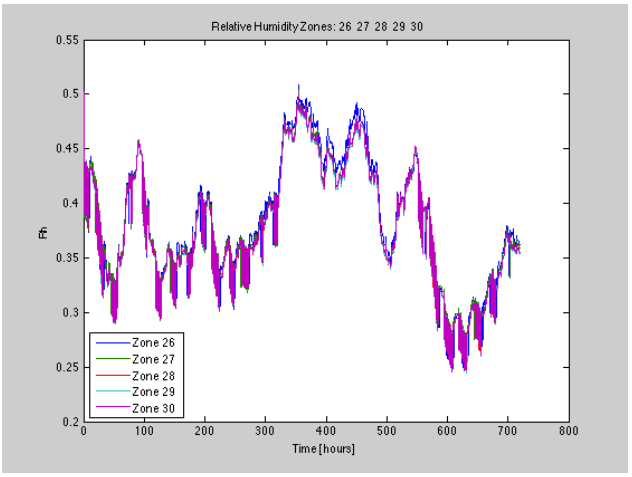


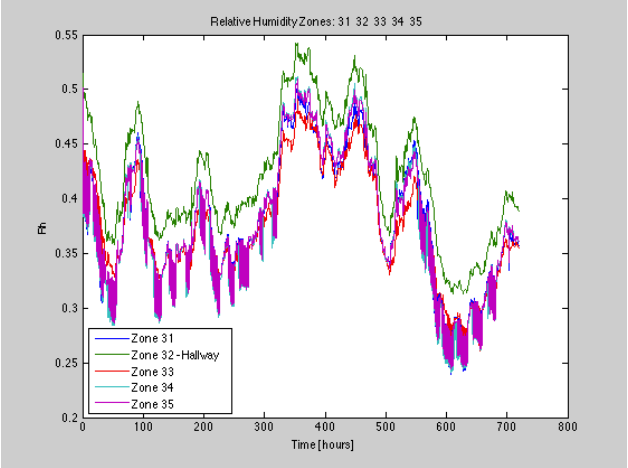


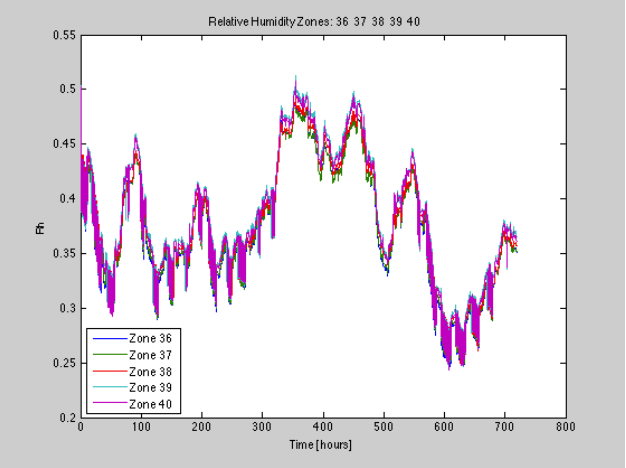


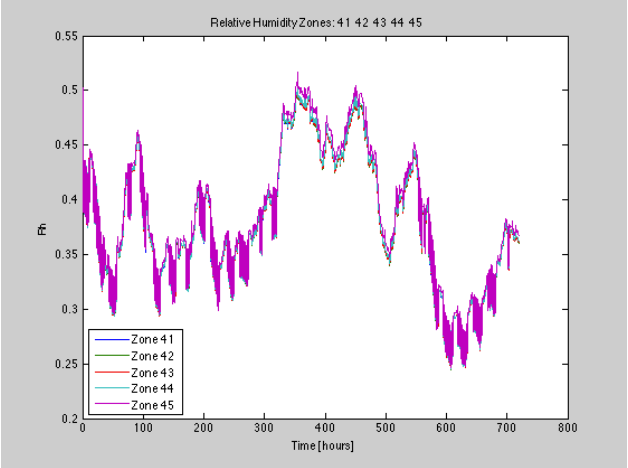


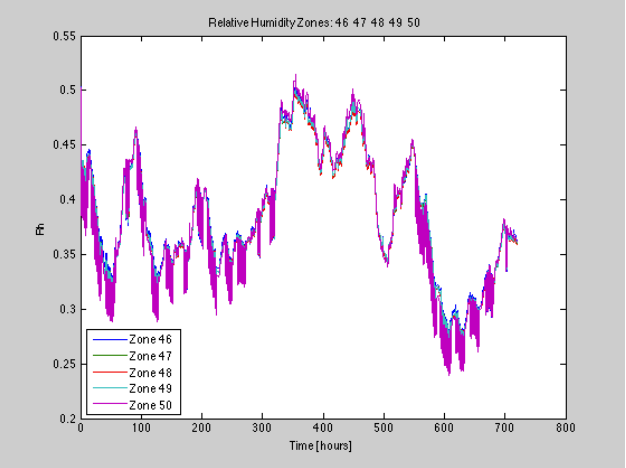


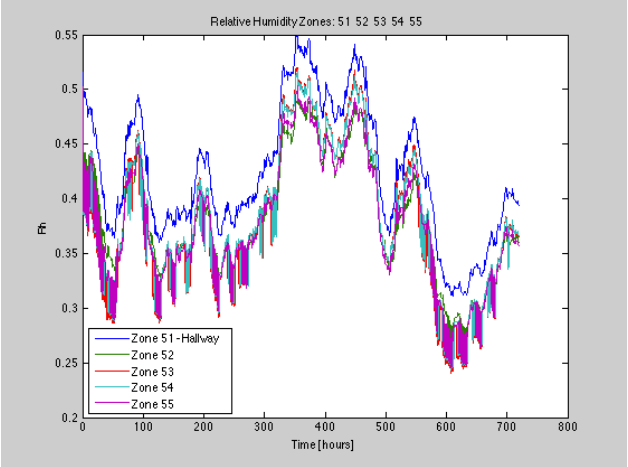


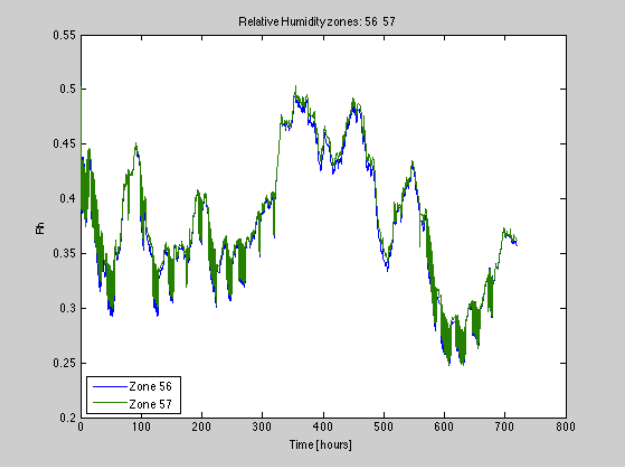

Relative Humidity Zones: 31 32 33 34 35
Rh
Time [hours]
Zone 31
Zone 32 - Hallway
Zone 33
Zone 34
Zone 35


Relative Humidity Zones: 36 37 38 39 40
Rh
Time [hours]
Zone 36
Zone 37
Zone 38
Zone 39
Zone 40

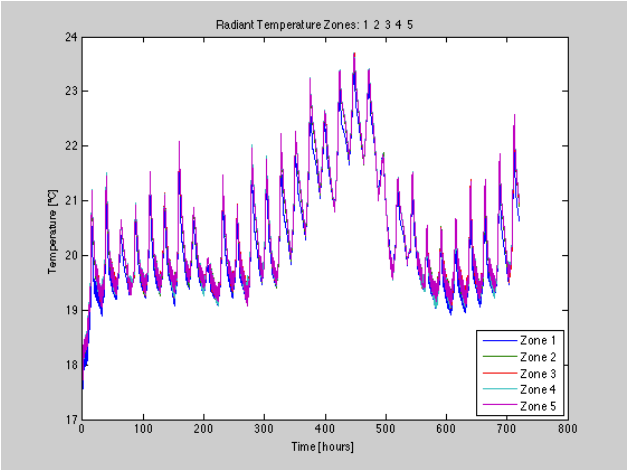

Relative Humidity Zones: 41 42 43 44 45
Rh
Time [hours]
Zone 41
Zone 42
Zone 43
Zone 44
Zone 45

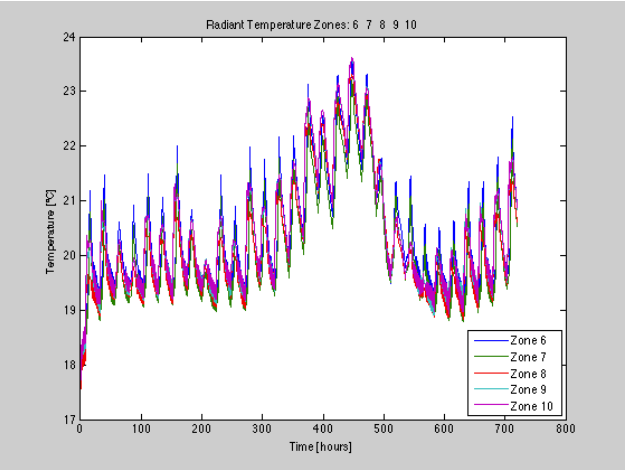

Relative Humidity Zones: 46 47 48 49 50
Rh
Time [hours]
Zone 46
Zone 47
Zone 48
Zone 49
Zone 50

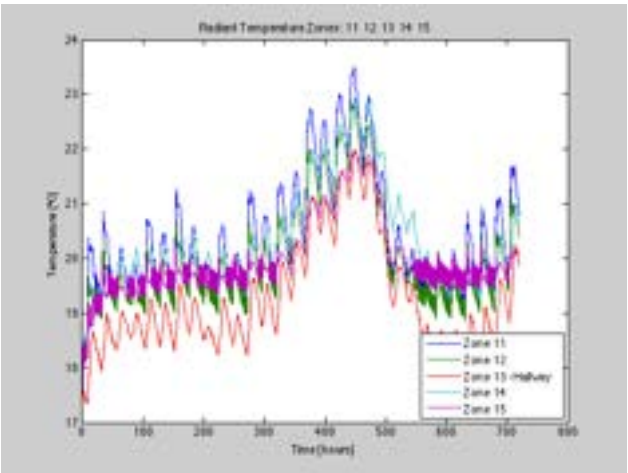

Relative Humidity Zones: 51 52 53 54 55
Rh
Time [hours]
Zone 51 - Hallway
Zone 52
Zone 53
Zone 54
Zone 55

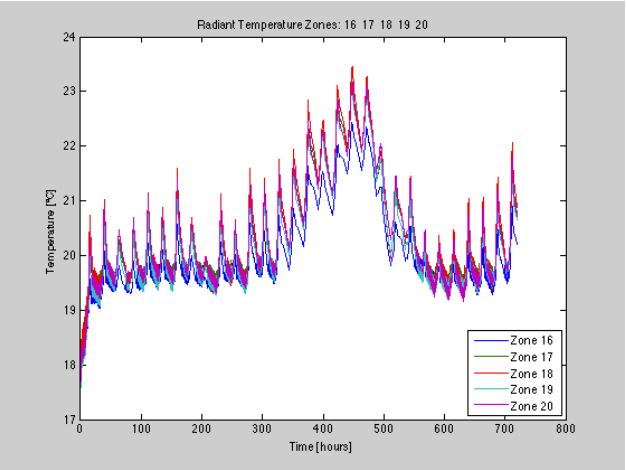

Relative Humidity zones: 56 57
Rh
Time [hours]
Zone 56
Zone 57

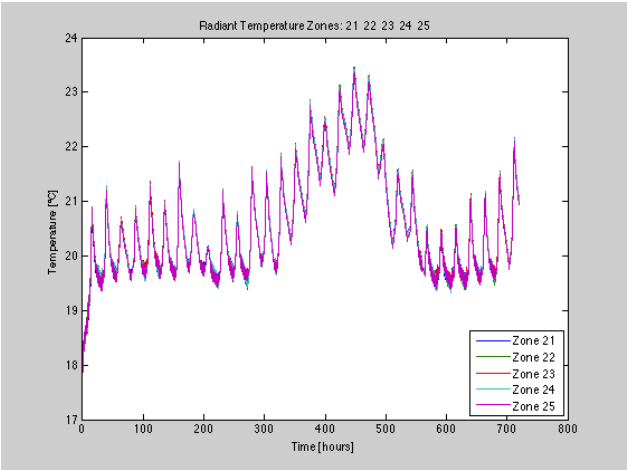
Temperatura media radiante delle pareti

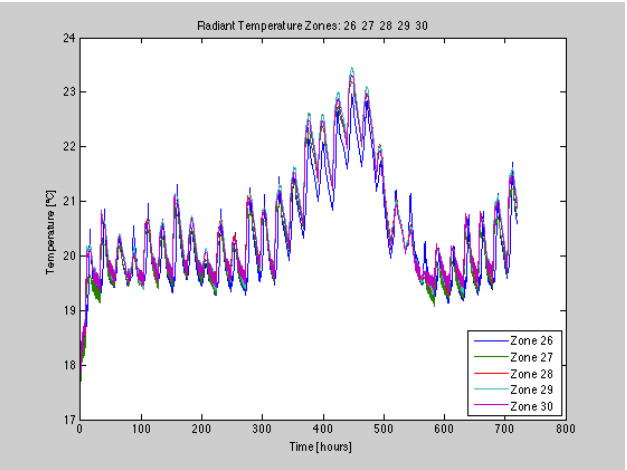


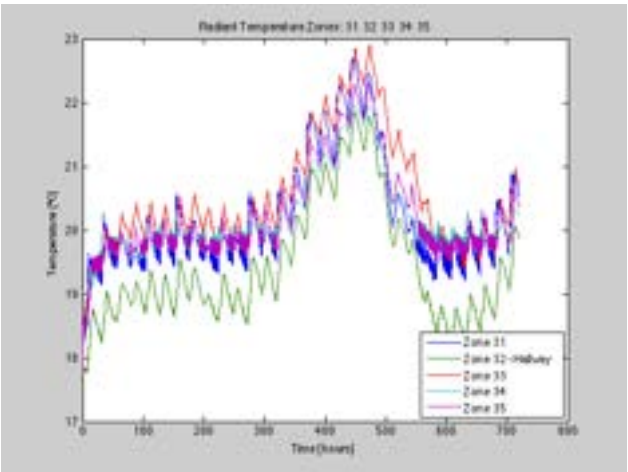


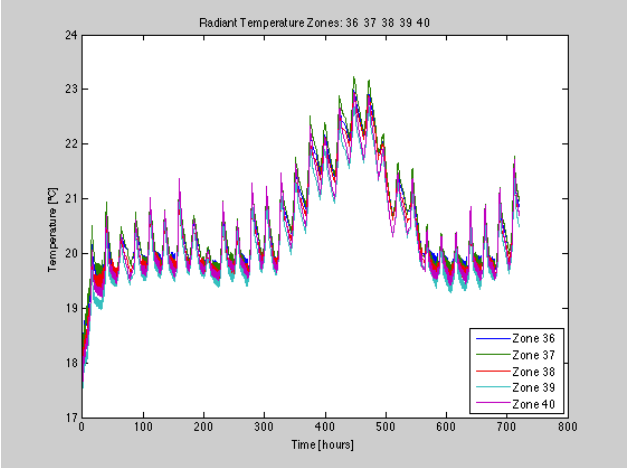


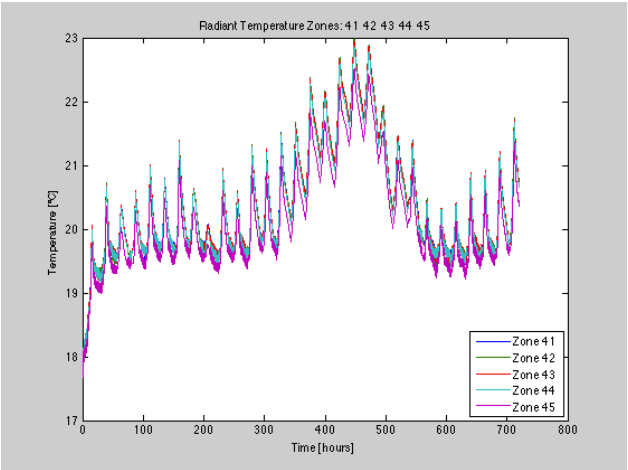


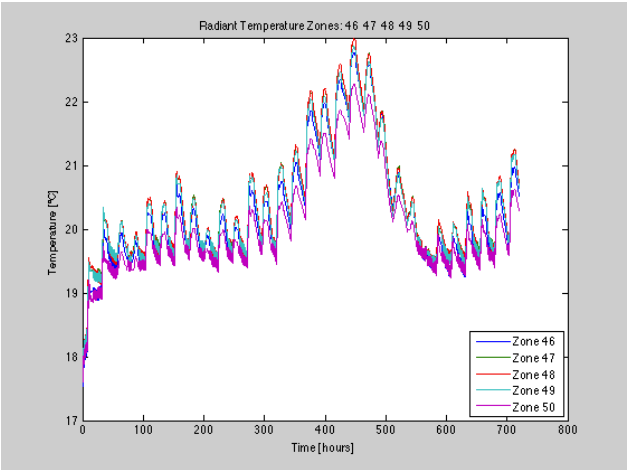


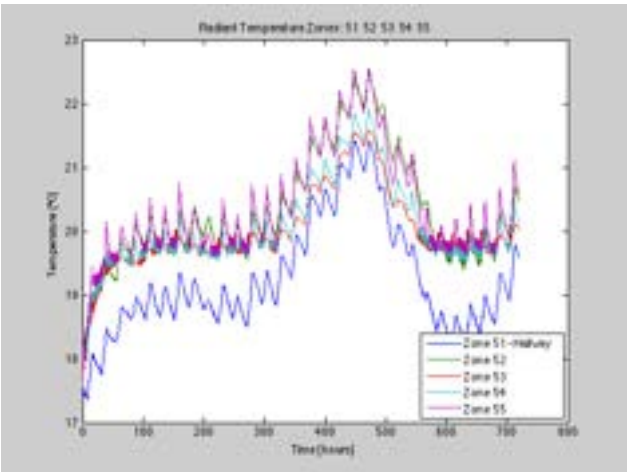


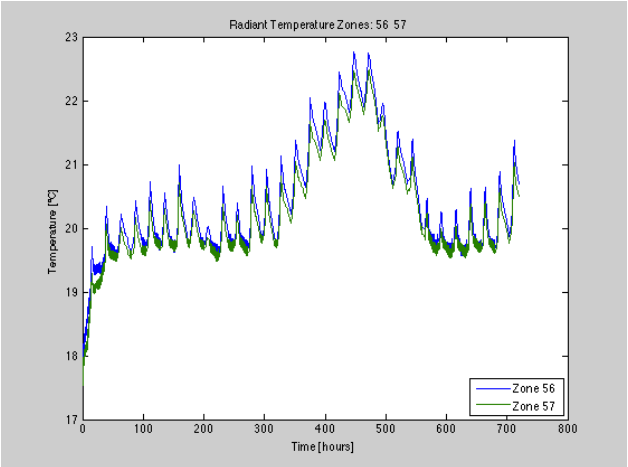

Radiant Temperature Zones: 31 32 33 34 35
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 31
Zone 32 -Hallway
Zone 33
Zone 34
Zone 35


Radiant Temperature Zones: 36 37 38 39 40
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 36
Zone 37
Zone 38
Zone 39
Zone 40


Radiant Temperature Zones: 41 42 43 44 45
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 41
Zone 42
Zone 43
Zone 44
Zone 45


Radiant Temperature Zones: 46 47 48 49 50
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 46
Zone 47
Zone 48
Zone 49
Zone 50

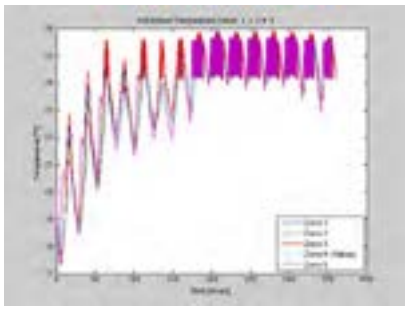

Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 51 -Hallway
Zone 52
Zone 53
Zone 54
Zone 55

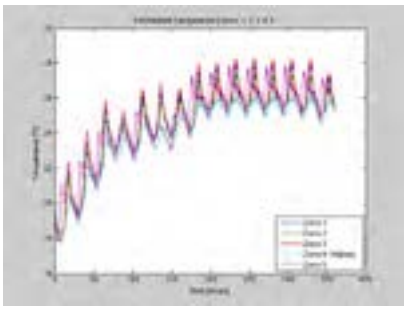

Radiant Temperature Zones: 56 57
Temperature [°C]
Time [hours]
Zone 56
Zone 57

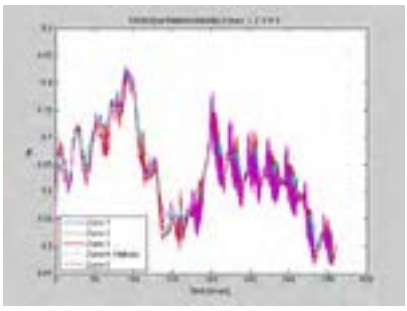
5.3 Risultati simulazioni per il cluster di edifici

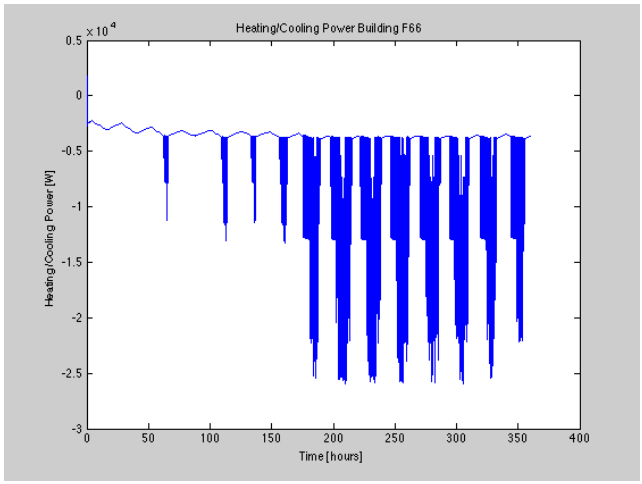
In questo paragrafo sono presentati i risultati principali per il cluster di edifici, simulato per la località di Roma per 15 giorni estivi (i primi 15 giorni di giugno). Pur essendo disponibili tutti i risultati (parametri ambientali interni ed impiantistici) presentati al paragrafo 5.1, in questo paragrafo presenteremo soltanto una selezione dei parametri più significativi: per ciascun edificio sono riportati gli andamenti delle temperature dell'aria interne, le temperature medie radianti, le umidità relative di ciascuna zona e l'andamento della potenza e dell'energia richiesta per il raffrescamento; infine viene riportato il consumo di energia elettrica del gruppo frigorifero a servizio dell'intero cluster di edifici.

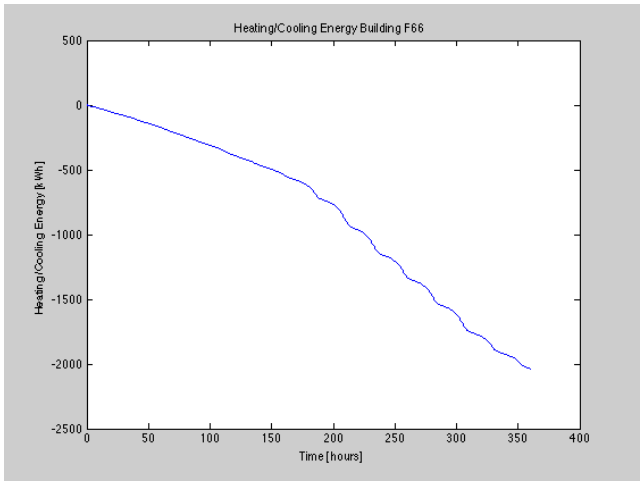
F66



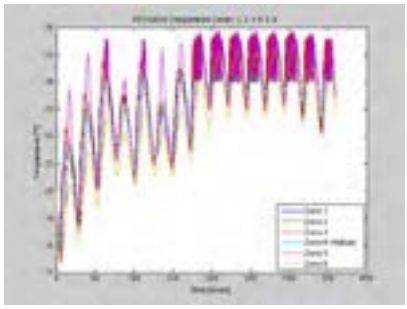
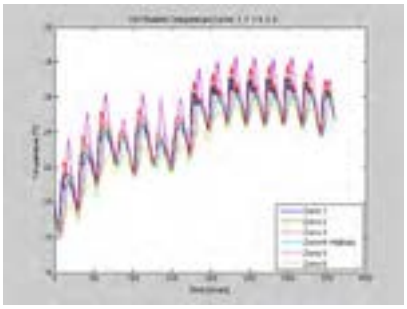
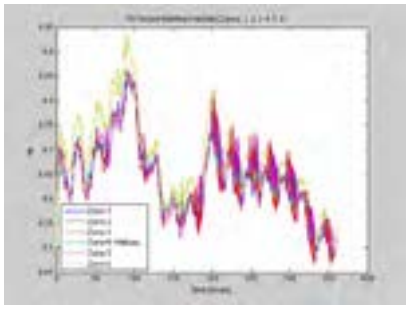


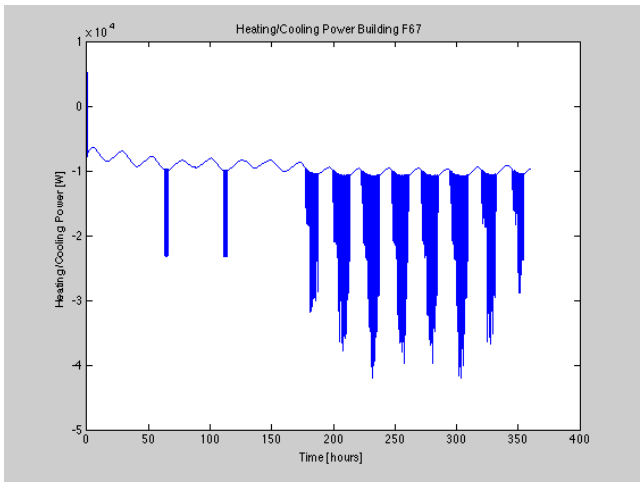


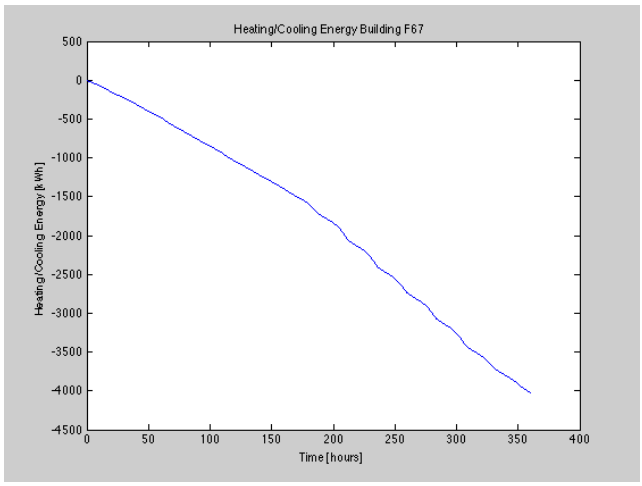




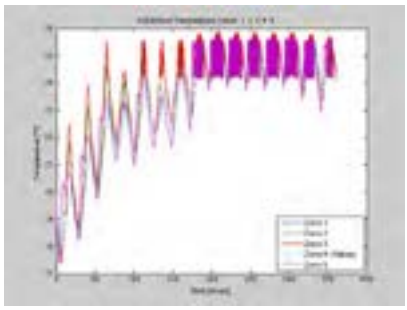
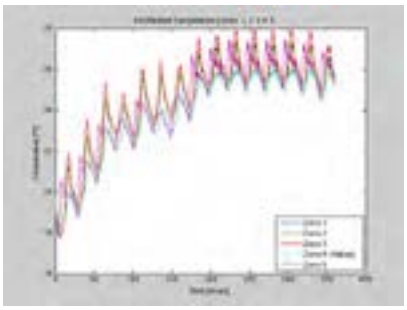
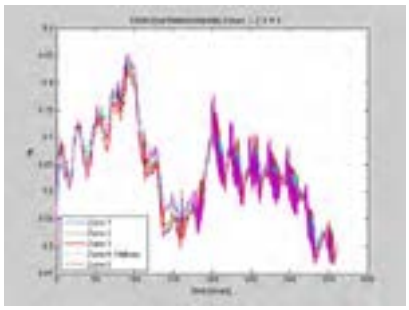
F67

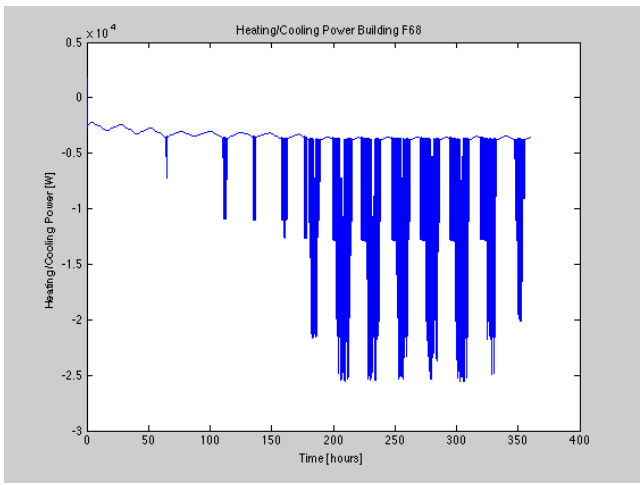




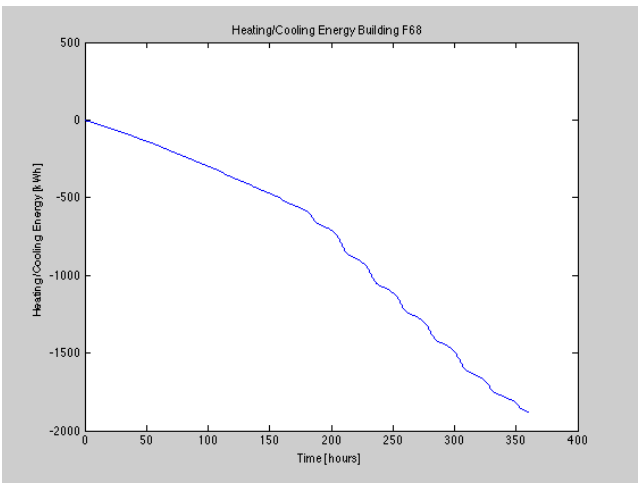

Heating/Cooling Power Building F67
x 10^4
Heating/Cooling Power [W]
Time [hours]


Heating/Cooling Energy Building F67
Heating/Cooling Energy [kWh]
Time [hours]

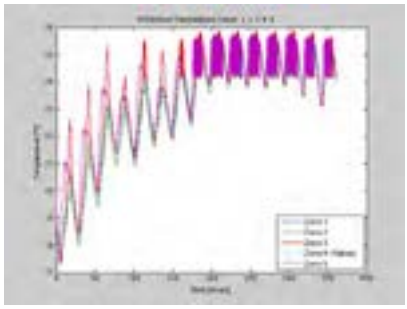
F68

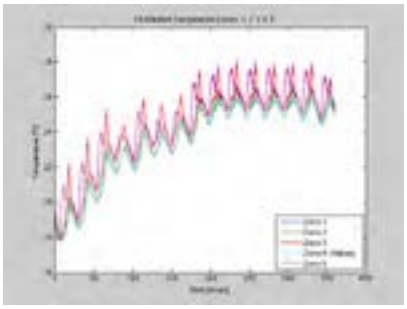




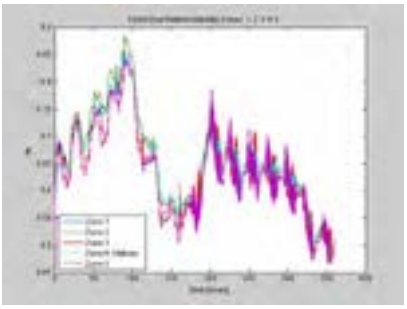

Heating/Cooling Power Building F68
x 10^4
Heating/Cooling Power [W]
Time [hours]

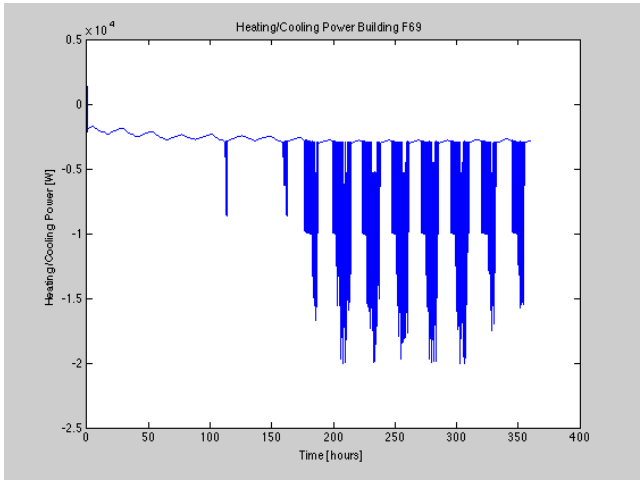

Heating/Cooling Energy Building F68
Heating/Cooling Energy [kWh]
Time [hours]

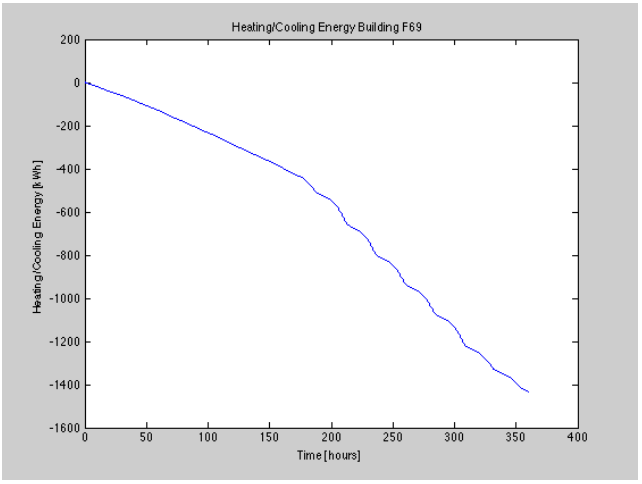
F69



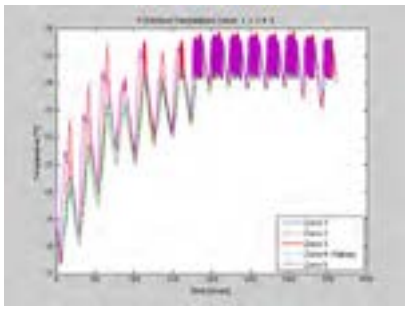


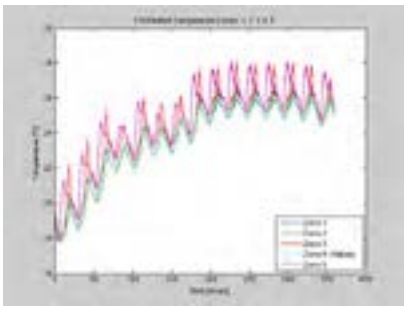


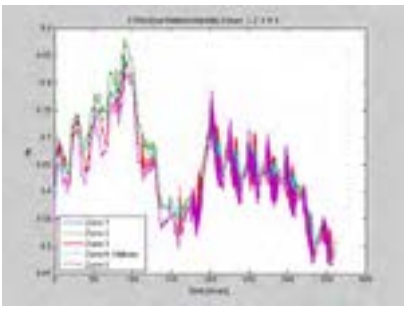

Heating/Cooling Power Building F69
x 10^4
Heating/Cooling Power [W]
Time [hours]

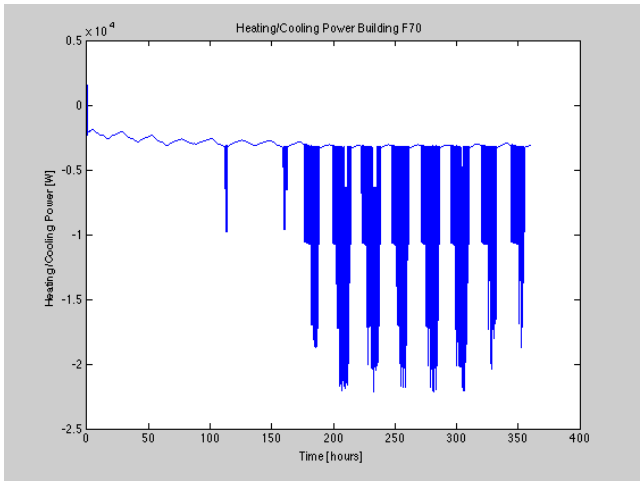

Heating/Cooling Energy Building F69
Heating/Cooling Energy [kWh]
Time [hours]

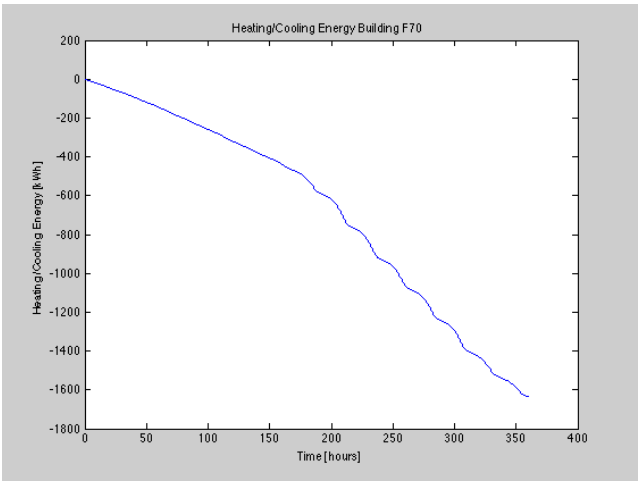
F70



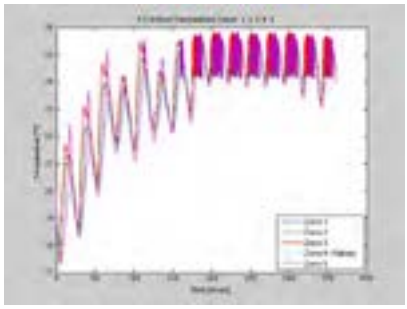
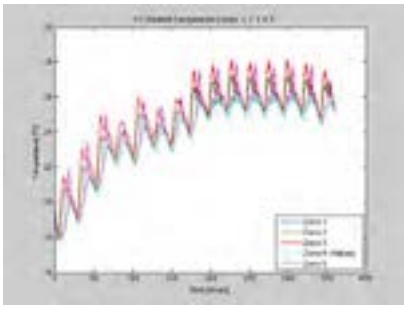
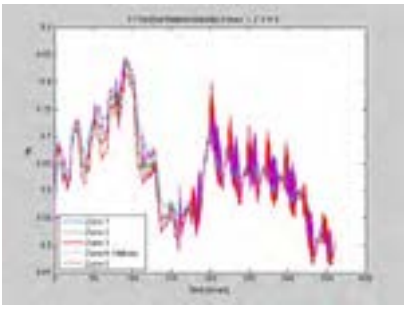


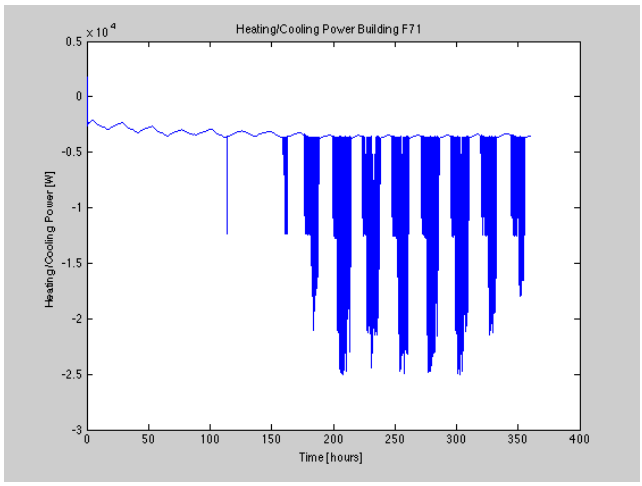


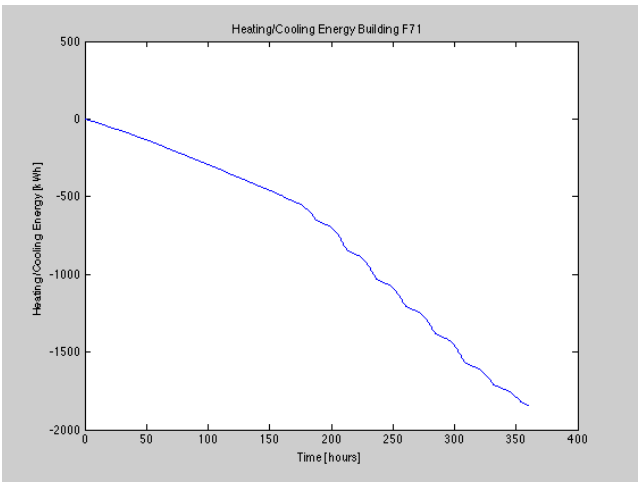

Heating/Cooling Power Building F70
x 10^4
Heating/Cooling Power [W]
Time [hours]


Heating/Cooling Energy Building F70
Heating/Cooling Energy [kWh]
Time [hours]

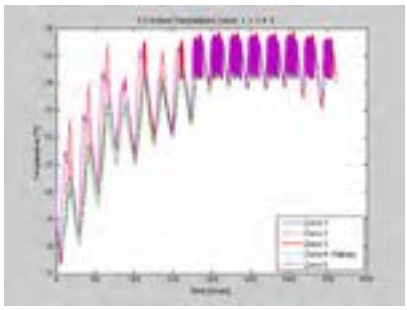
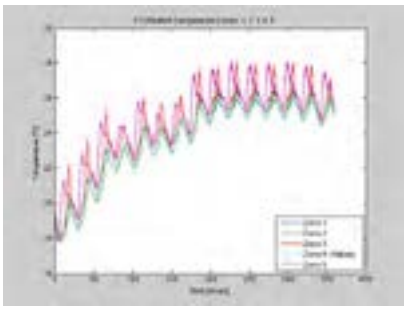
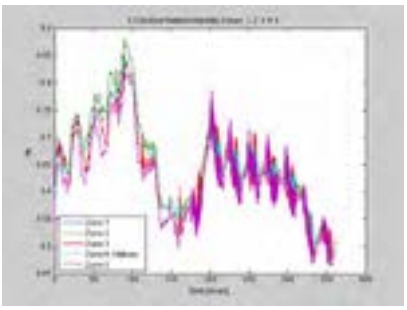
F71

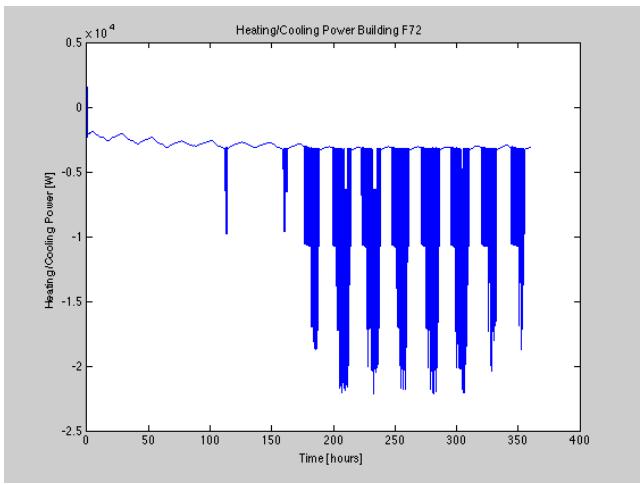




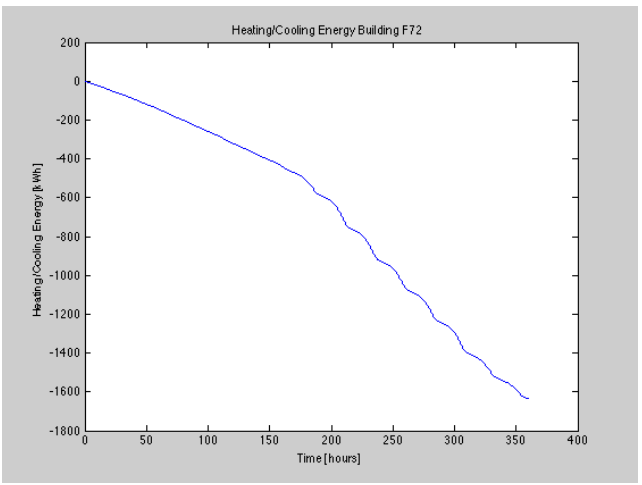

Heating/Cooling Power Building F71
×10^4
Heating/Cooling Power [W]
Time [hours]


Heating/Cooling Energy Building F71
Heating/Cooling Energy [kWh]
Time [hours]

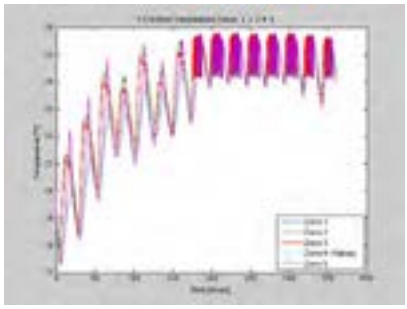
F72

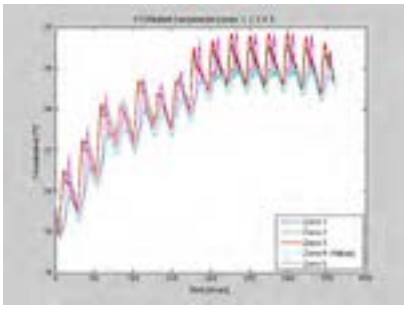




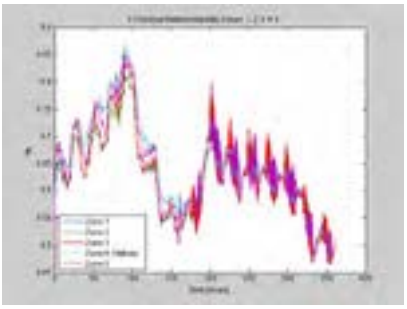

Heating/Cooling Power Building F72
×10^4
Heating/Cooling Power [W]
Time [hours]

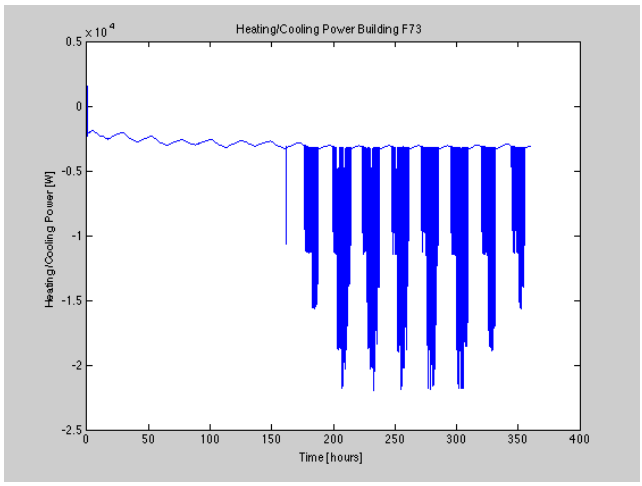

Heating/Cooling Energy Building F72
Heating/Cooling Energy [kWh]
Time [hours]

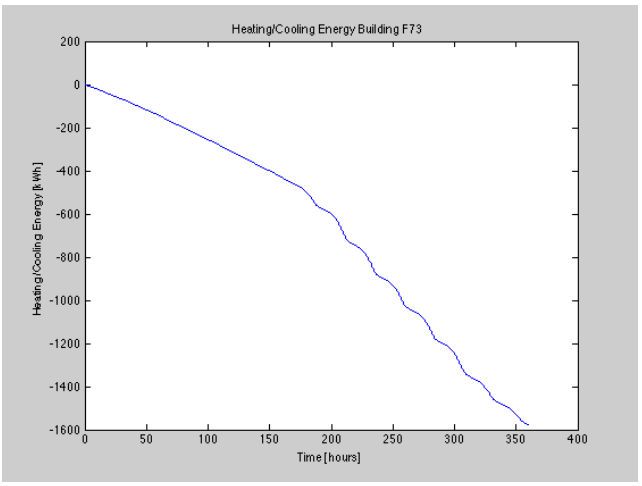
F73



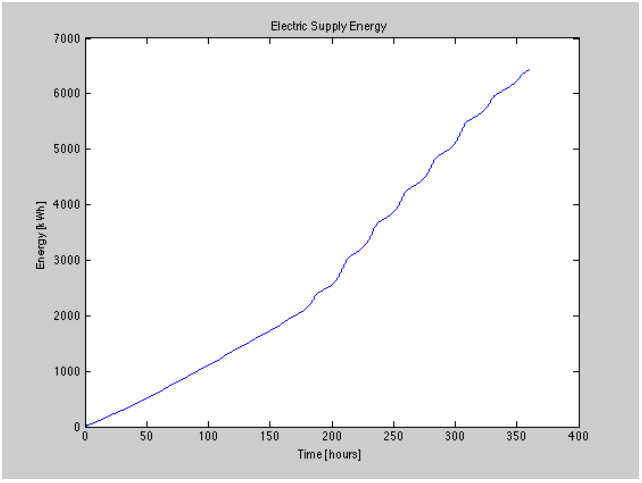








Energia elettrica consumata dal gruppo frigorifero a servizio del cluster



6 Conclusioni

Il software sviluppato e presentato in questa relazione tecnica, è uno strumento che permette di simulare i consumi energetici e le principali variabili ambientali interne di un edificio e di un cluster di edifici. I risultati presentati dimostrano le potenzialità e la flessibilità del simulatore nel riprodurre diverse condizioni operative e di implementare strategie di controllo qualora fosse necessario. La flessibilità a simulare sistemi anche complessi è dimostrata dal fatto che lo stesso sistema può essere fatto girare con più modelli di edifici differenti semplicemente cambiando il file di configurazione dell'edificio steso. Questo è quanto avvenuto per il modello dell'edificio F40 a 15 e a 57 zone. Il simulatore del cluster simula una rete di 8 edifici, ciascuno con solo 5 zone. Cambiando il file di configurazione di ciascun edificio, inserendo il file di configurazione a 57 zone, si potrebbe simulare una rete di edifici con lo stesso dettaglio dell'F40, per un totale di 456 zone.
Lo strumento sviluppato sia nella versione "edificio" che nella versione "cluster" è quindi in grado di ricostruire i consumi termici ed elettrici del sistema e di simularne strategie di controllo su scale diverse (singolo edificio o cluster di edifici). I parametri ambientali interni all'edificio così come i consumi energetici possono essere elaborati al fine di individuare indici di valutazione energetica e di comfort.

Infine, pur essendo già in stato avanzato di sviluppo, di seguito elenchiamo quelle che sono alcuni possibili sviluppi futuri immediati.

Calibrazione del cluster: Il modello del cluster presentato dovrà essere calibrato in base ai dati di consumo reali che provengono dal sistema di sensori installato.

Modello reale del gruppo frigorifero: attualmente il calcolo della potenza elettrica consumata avviene impostando un COP costante pari a 2.5. Al termine della campagna di rilevamento estiva è possibile sostituire questo valore con una curva reale del COP dei due gruppi frigoriferi: quello a servizio della palazzina F40 e quello a servizio del cluster di edifici.

Miglioramento software con gestore dei carichi termici esterno: va migliorata, probabilmente con un sistema a monte del simulatore, la possibilità di gestire, creare e modificare i carichi termici.

Miglioramento software con gestore dei carichi elettrici esterno: così come per il termico, va migliorata la possibilità di gestire, creare e modificare i carichi elettrici integrando i consumi del gruppo frigorifero con quelli del simulatore per l'illuminazione sviluppato nello scorso PAR.

Rifiniture e altre piccole migliorie: essendo un lavoro in divenire ci sono sicuramente delle piccole migliorie e delle rifiniture da implementare: queste vanno dagli aspetti riguardanti la programmazione, ad altri riguardanti l'inserimento di dati.

7 Bibliografia

Schijndel, A.W.M. van (2007). Integrated heat air and moisture modeling and simulation. Eindhoven: Technische Universiteit, PhD thesis, 200 pages.

http://archbps1.campus.tue.nl/bpswiki/index.php/Hamlab

Wit, M.H. de, (2006). HAMBase, Heat, Air and Moisture Model for Building and Systems Evaluation, Bouwstenen 100, Eindhoven University of Technology

Guglielmini, G., Pisoni, C. Elementi di trasmissione del calore. Casa Editrice Ambrosiana

8 APPENDICE 1: SINTESI DATI METEO

Roma/Ciampino

Location name

162390 WMO	41.8 Latitude [°N]	12.583 Longitude [°E]
	131 Altitude [m a.s.l.]	IV, 1 Climate region

Standard Radiation model	Standard Temperature model	Perez Tilt radiation model
2000–2009 Temperature period	1986–2005 Radiation period	
0° Azimuth	30° Inclination	

Additional information

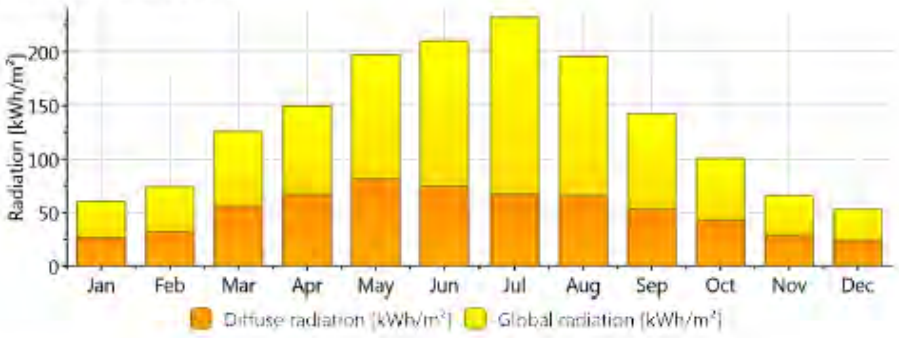
Uncertainty of yearly values: Gh = 2%, Bn = 4%, Gk = 2%, Ta = 0.3 °C
Trend of Gh / decade: -0.9%
Variability of Gh / year: 4.0%
Radiation interpolation locations: Satellite data

Month	G_Dh	Ta	G_Bn	N	RH	FF	DD
	[W/m2]	[1/10 C]	[W/m2]	[octas]	[%]	[1/10 m/s]	[deg]
January	36	70	128	4	79	26	45
February	48	78	138	5	74	29	180
March	75	107	179	4	74	31	180
April	93	139	186	5	73	29	180
May	109	187	238	4	68	27	180
June	104	230	275	3	63	28	180
July	90	253	328	2	59	26	180
August	88	252	271	3	63	26	180
September	74	208	217	4	71	25	180
October	58	171	159	4	78	25	180
November	40	124	131	5	81	31	180
December	32	85	118	5	80	26	45
Year	71	159	198	4	72	28	171

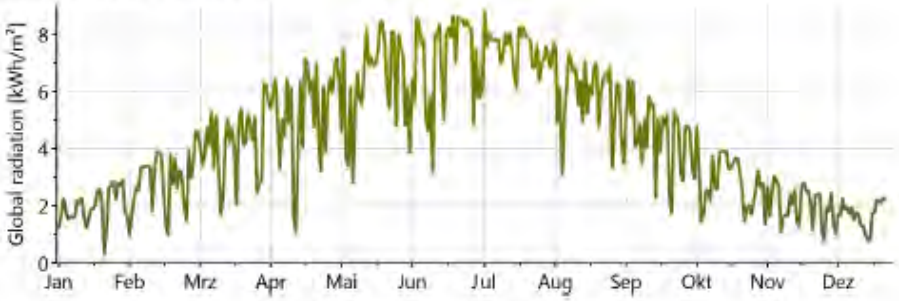
G_Dh: Mean irradiance of diffuse radiation horizontal
G_Bn: Irradiance of beam
Ta: Air temperature
RH: Relative humidity
N: Cloud cover fraction
FF: Wind speed
DD: Wind direction

meteonorm

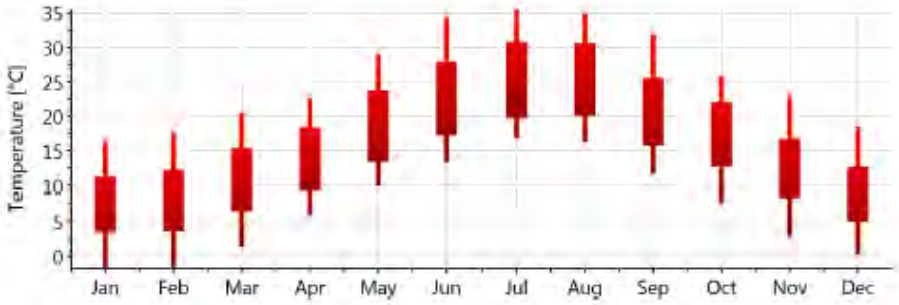
Monthly radiation



Daily global radiation

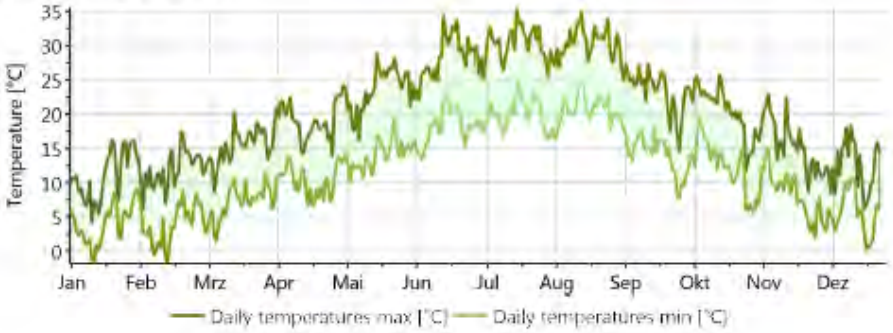


Monthly temperature

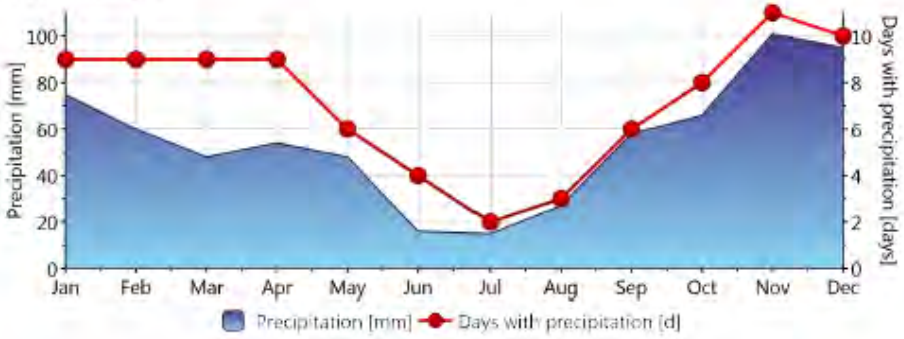


meteonorm

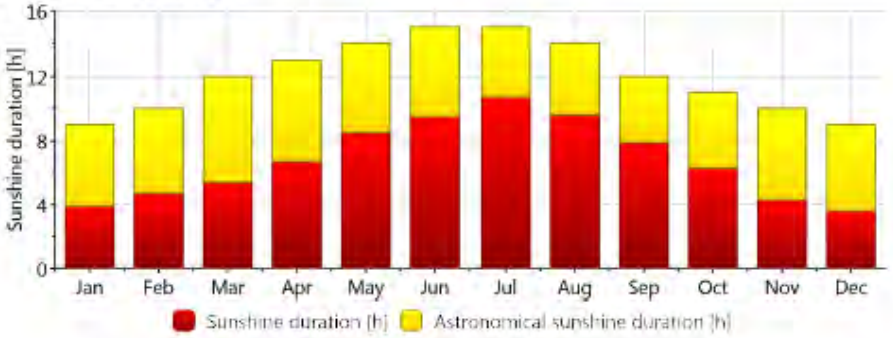
Daily temperature



Precipitation



Sunshine duration



meteonorm

Ancona/Falconara

Location name

43.617 Latitude [°N]

13.517 Longitude [°E]

161910 WMO

105 Altitude [m a.s.l.]

IV, 1 Climate region

Standard Radiation model

Standard Temperature model

Perez Tilt radiation model

2000–2009 Temperature period

1986–2005 Radiation period

0° Azimuth

30° Inclination

Additional information

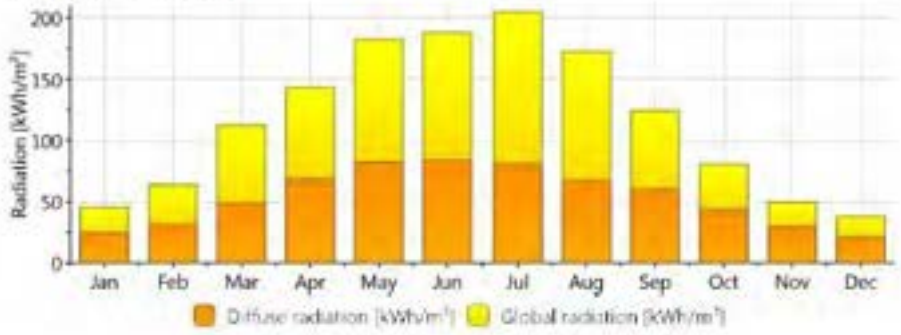
Uncertainty of yearly values: Gh = 3%, Bn = 6%, Gk = 4%, Ta = 0.3 °C
Trend of Gh / decade: -
Variability of Gh / year: 6.1%
Radiation interpolation locations: Satellite data

Month	G_Dh	Ta	G_Bn	N	RH	FF	DD
	[W/m2]	[1/10 C]	[W/m2]	[octas]	[%]	[1/10 m/s]	[deg]
January	33	55	84	6	72	26	146
February	47	65	118	5	69	30	146
March	66	100	163	5	68	31	176
April	96	130	169	5	71	28	176
May	111	181	210	4	70	26	123
June	117	223	216	4	66	28	80
July	110	244	252	4	64	30	93
August	91	242	221	4	66	28	80
September	84	196	159	5	70	28	66
October	59	159	103	6	75	25	146
November	42	112	75	6	73	25	146
December	29	70	74	6	73	26	146
Year	74	146	154	5	70	28	127

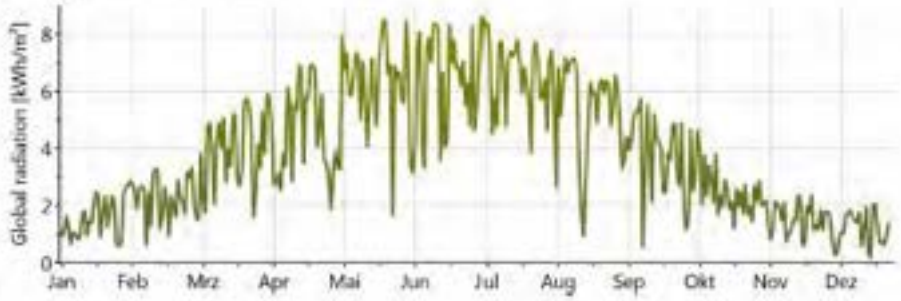
G_Dh: Mean irradiance of diffuse radiation horizontal
G_Bn: Irradiance of beam
Ta: Air temperature
RH: Relative humidity
N: Cloud cover fraction
FF: Wind speed
DD: Wind direction

meteonorm

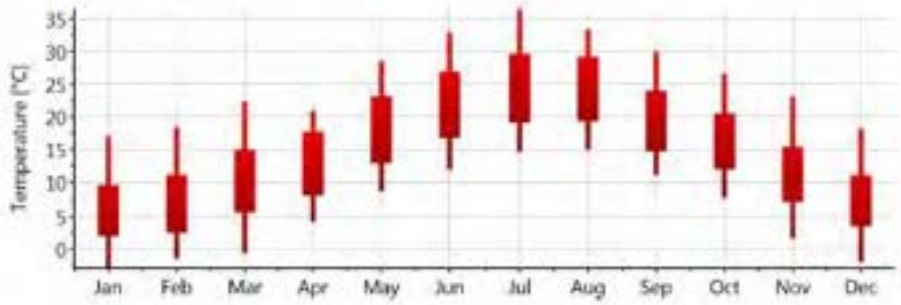
Monthly radiation



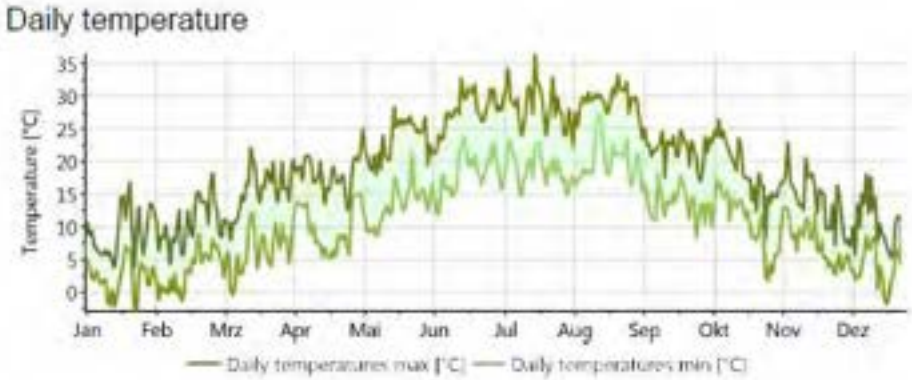
Daily global radiation

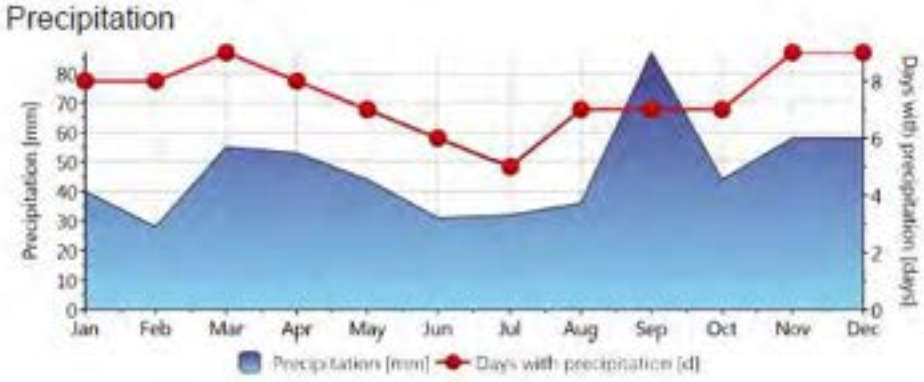


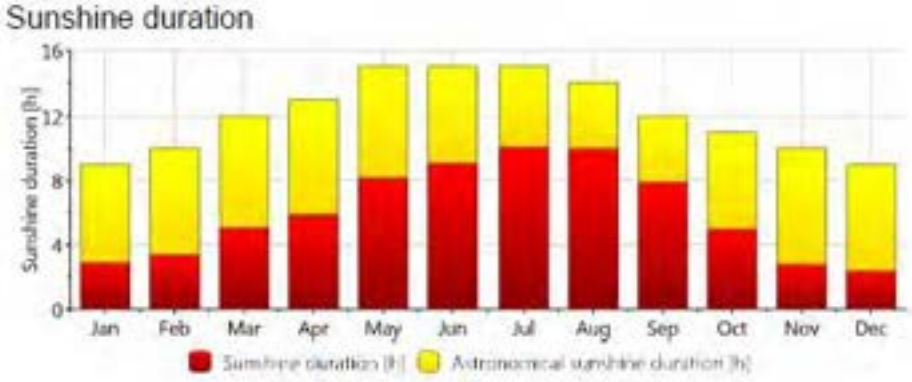
Monthly temperature



meteonorm


Daily temperature
Temperature [°C]
35
30
25
20
15
10
5
0
Jan
Feb
Mrz
Apr
Mai
Jun
Jul
Aug
Sep
Okt
Nov
Dez
Daily temperatures max [°C]
Daily temperatures min [°C]


Precipitation
Precipitation [mm]
Days with precipitation [days]
80
70
60
50
40
30
20
10
0
8
6
4
2
0
Jan
Feb
Mar
Apr
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec
Precipitation [mm]
Days with precipitation [d]


Sunshine duration
Sunshine duration [h]
16
12
8
4
0
Jan
Feb
Mar
Apr
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec
Sunshine duration [h]
Astronomical sunshine duration [h]

meteonorm

9 APPENDICE 2: curriculum scientifico degli autori

9.1 Gabriele Comodi

Gabriele Comodi è nato a Fabriano il 21 giugno 1976; ha conseguito la laurea in ingegneria meccanica nel 2001 con la votazione di 110 e lode presso l'Università degli studi di Ancona (ora Politecnica delle Marche). Nel 2004 acquisisce il titolo di dottore di ricerca in "Energetica" presso il Dipartimento di Energetica (ora DIISM – Dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche) dell'Università Politecnica delle Marche. In seguito, è stato titolare di 3 assegni di ricerca annuali e nel 2007 è diventato ricercatore presso il Dipartimento di Energetica dell'Università Politecnica delle Marche. Attualmente è ricercatore confermato persso il DIISM nel settore scientifico disciplinare "Sistemi per l'Energia e l'ambiente" (ING-IND/09).

I principali temi di ricerca sono: i) tecnologie di generazione e cogenerazione distribuita (in particolare, microturbine a gas, motori Stirling, motori a combustione interna, PV e CPV); ii) efficienza energetica negli usi finali dell'energia; iii) demand side management di reti di edifici civili; iv) politica energetica locale. E' autore di oltre 40 pubblicazioni a livello nazionale ed internazionale. E' titolare di un brevetto industriale. E' stato relatore/correlatore di oltre 80 tesi di laurea triennale e specialistica.

E' membro del gruppo di lavoro "Urban Energy Network" del Joint Program EERA-"Smart Cities" ed è membro della Task Force "Simulation Tools" dello stesso Joint Program.

9.2 Alessandro Fonti

Alessandro Fonti si è laureato con il massimo dei voti in Ingegneria Elettronica ad indirizzo "Controlli Automatici" presso L'Università Politecnica delle Marche. Durante gli studi universitari ha avuto un breve esperienza nell'industria come analista per l'ottimizzazione dei processi produttivi nel settore "fashion". Completati gli studi universitari ha svolto uno stage presso la Gitronica S.p.a. del Gruppo Guzzini in qualità di progettista. Dal Novembre 2012 è titolare di borsa di studio per la Scuola di Dottorato in Scienza dell'Ingegneria, curriculum "Energetica", presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università Politecnica delle Marche. I suoi campi di ricerca principali sono la modellazione ed il controllo di sistemi complessi per l'efficienza energetica nel campo delle "smart cities" e degli "smart buildings" e l'analisi e l'ottimizzazione di processi produttivi industriali.

9.3 Andrea Giantomassi

Andrea Giantomassi ha ricevuto la laurea magistrale in Ingegneria dell'Automazione Industriale e il dottorato di ricerca in Scienze dell'Ingegneria presso l'Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia, nel 2008 e nel 2012, rispettivamente. I suoi interessi di ricerca includono la modellazione, l'identificazione e il controllo di sistemi non lineari, identificazione e controllo basati su reti neurali, rilevamento dei guasti e diagnosi basati sui segnali nei sistemi industriali e l'analisi e l'ottimizzazione dell'efficienza energetica nella building automation.

9.4 Fabio Polonara

Fabio Polonara è professore ordinario di Fisica Tecnica industriale e afferisce al Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche. Dal 2008 al 2011 è stato Direttore del Dipartimento di Energetica dello stesso Ateneo, poi confluito nel DIISM.

Svolge la sua attività didattica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, dove tiene i corsi di Fisica Tecnica per allievi ingegneri meccanici e di Termotecnica al corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica. Tra il 1990 e il 1994 è stato docente in corsi e seminari organizzati dall'Unione Europea in Spagna, Portogallo e Malta nell'ambito dei programmi COMETT e MED-CAMPUS. Le attività di ricerca riguardano i temi della tecnica del freddo, delle proprietà termofisiche dei materiali, delle energie rinnovabili e dell'energetica. Si è occupato in particolare di proprietà termofisiche dei fluidi di lavoro alternativi ai CloroFluoroCarburi per impieghi in macchine frigorifere e pompe di calore e attualmente è

impegnato nella ricerca sui biocombustibili e sull'uso energetico della biomassa proveniente dalle microalghe.

All'interno dei diversi filoni di ricerca è stato responsabile scientifico di Unità di ricerca operanti nell'ambito dei programmi JOULE, FLAIR e EIE dell'Unione Europea. Nel 1991 e nel 1997 ha usufruito di borse di studio NATO-CNR per svolgere studi e ricerche sui refrigeranti alternativi ai CFC presso l'University of Ulster, UK. Nel campo della pianificazione energetica è stato il coordinatore del gruppo di lavoro che ha redatto per conto della Regione Marche il Piano Energetico Ambientale Regionale (PEAR) approvato nel febbraio 2005. Ha collaborato alla redazione dei Piani Energetici delle Province di Ancona e di Ascoli Piceno e di sette tra i principali Comuni delle Marche.

E' vice-presidente della Commissione A2 (liquefazione dei gas) dell'International Institute of Refrigeration di Parigi. E' autore di oltre 170 lavori riguardanti i temi di ricerca affrontati, pubblicati su riviste scientifiche nazionali ed internazionali e presentati a congressi nazionali ed internazionali.

9.5 Sauro Longhi

Sauro Longhi è nato a Loreto l'11 Settembre 1955. Ha conseguito la Laurea in Ingegneria Elettronica nel 1979 presso l'Università di Ancona e la specializzazione in "Ingegneria dei Sistemi di Controllo e di Calcolo Automatici" nel 1984 presso l'Università di Roma "La Sapienza". Dal 1980 al 1981 ha usufruito di una borsa di studio all'Università di Ancona. Dal 1981 al 1983 ha svolto un'attività di ricerca e progettazione elettronica presso il Laboratorio di Ricerca e Sviluppo della Telettra S.p.A. di Chieti, interessandosi principalmente di sistemi di modulazione e demodulazione numerica per sistemi di trasmissione a spettro espanso. Dal 1983 ha collaborato in diverse posizioni all'attività scientifica e didattica del Dipartimento di Elettronica ed Automatica dell'Università di Ancona, ora Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università Politecnica delle Marche - Ancona. Dal Luglio 2011 e' il Direttore di questo Dipartimento.

A partire dal 1° Novembre 2013, sarà il nuovo Rettore dell'Università Politecnica delle Marche.

E' coordinatore e responsabile del progetto di ricerca "Ecosistemi domestici condivisi edinteroperabili per ambienti di vita sostenibili, confortevoli e sicuri (SHELL)", finanziato nell'ambito del bando MIUR "Cluster Tecnologici Nazionali", ambito "Tecnologie per gli ambienti di vita".

Attualmente e' professore ordinario in Robotica Assistiva, coordinatore dei corsi di Laurea e di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica e dell'Automazione, coordinatore del dottorato di ricerca in Ingegneria Informatica, Gestionale e dell'Automazione e coordinatore del Master di II livello in Smart Home Engineering dell'Università Politecnica delle Marche - Ancona.

E' componente del comitato tecnico-scientifico del Centro Interdipartimentale sull'Innovazione e l'Imprenditorialità (Facoltà di Ingegneria) per il trasferimento tecnologico e la creazione di nuove imprese ad alta tecnologia nell'ambito dell'Ambient Assisted Living, e della Giunta del Centro Interdipartimentale di Ricerca per l'Adriatico e i Balcani (Facoltà di Economia) per l'interscambio scientifico e l'integrazione sociale.

I principali interessi di ricerca includono l'analisi ed il controllo di sistemi lineari e non lineari, il controllo di robot mobili, di veicoli sottomarini, di vascelli e di velivoli autonomi, il controllo cooperativo di agenti autonomi, lo sviluppo di sistemi robotici per l'ausilio a disabili motori e cognitivi, la domotica, le tecnologie web per il controllo di processo e laboratori didattici remoti, il controllo distribuito su reti di trasmissione dati, le reti sensoriali, la gestione della potenza in auto ibride, il controllo di motori elettrici ad alta efficienza, sistemi di controllo embedded, la gestione e il controllo di fonti di energia rinnovabili, la gestione efficiente di sistemi energetici, la rilevazione e diagnosi guasti in macchine ed impianti.

Negli ultimi anni l'attività di ricerca si è concentrata nello sviluppo di soluzioni innovative per la robotica e le

tecnologie abilitanti in campi non convenzionali come quello di supporto alla vita indipendente e sicura e più in generale nella domotica per assistere la popolazione anziana. In questo contesto collabora come responsabile dell'Unita' di Ricerca dell'Università Politecnica delle Marche al progetto europeo JADE - FP7-CAPACITIES-2010-1 (Regions of knowledge). Il progetto mira allo sviluppo di servizi e piattaforme per la tele assistenza e la vita indipendente per un sano invecchiamento della popolazione. Per favorire lo sviluppo di questi servizi e piattaforme coordina anche il progetto nazionale "SMart In home LIviNG: Tecnologie innovative per la sensoristica e l'automazione dedicate alla Domotica", sul Programma RIDITT del Ministero dello Sviluppo Economico. Il progetto punta al trasferimento dall'ambito della ricerca verso il mondo delle imprese di tecnologie avanzate per l'automazione e la sensoristica finalizzate all'applicazione nel campo della domotica, per sviluppare prodotti innovativi ed erogare nuovi servizi per migliorare la qualità dell'abitare. Come ulteriore ricaduta dell'attività di ricerca e per la sempre maggiore richiesta di tecnologie di supporto all'assistenza della popolazione anziana, ha recentemente progettato e sviluppato un percorso di alta formazione, un Master di secondo livello in Smart Home Engineering, dove particolare attenzione è stata riservata alle problematiche di Ambient Assisted Living (AAL).

Nello specifico settore della domotica e' inoltre componente del comitato scientifico del consorzio di ricerca e sviluppo HOME LAB (distretto Italiano sulla Domotica) dedicato ai sistemi energetici e all'Ambient Assisted Living per la Smart Home del futuro, ed e' coordinatore e responsabile scientifico dell'Accordo Quadro "Campus" per attività di ricerca e didattica tra la Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche e l'Ariston Thermo Group s.p.a. E' stato Advisor di 22 Dottori di Ricerca, ed attualmente è Advisor di 8 dottorandi di ricerca. E' stato Relatore di oltre 200 tesi di laurea magistrale, attualmente è relatore di piu' di 10 studenti di laurea magistrale.

Ha pubblicato piu' di 300 lavori su riviste e congressi internazionali. Le diverse attività di ricerca sono state finanziate su fondi MIUR, MiSE, CNR, ASI e Comunità Europea. I più recenti progetti finanziati e correlati con la presente proposta sono: - OSTIS - Operating System and Tools for Interoperable smart electrical household appliances, Bando Industria 2015, Ministero dello Sviluppo Economico;

- SEA - Smart Ecologic Area: La nuova tecnologia al servizio dell'ambiente, POR MARCHE 2007/2013 : Sostegno alla nascita e allo sviluppo di nuove imprese innovative – 1.3.1.07. 01; - iFOOD , POR MARCHE FESR 2007-2013, 1.1.1.04.03; - MObility and actiVity AssIstance systems for the Disabled (MOVAID), Community R&D / TIDE Technology Initiative for Disabled and Elderly People/PILOT & BRIDGE Phases

- DIAGNOSTIC ROBOTS: new systems based on mobile autonomous robots for diagnosis and testing in the production line and in life tests laboratories of house-hold appliances, POR MARCHE, 1.1.1.04.02 "Promozione della ricerca industriale e dello sviluppo sperimentale in filiere tecnologico-produttive" ; - JADE - FP7-CAPACITIES-2010-1 (Regions of knowledge);

- "SMart In home LIviNG: Tecnologie innovative per la sensoristica e l'automazione dedicate alla Domotica", sul Programma RIDITT del Ministero dello Sviluppo Economico. - Robust and Safe Mobile Co-operative Autonomous Systems (R3-COOP), EU ARTEMIS Joint Undertaking, for developing cooperative robots in service and domestic fields.

Dal 1997 collabora alle attività scientifiche ed organizzative del Technical Committee on Marine Systems dell'International Federation of Automatic Control (IFAC). Ha coordinato le attività organizzative dell' IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Ancona, Italy, July 2004 ed ha presieduto il comitato scientifico internazionale dell' IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Bol, Croatia, Settembre 2007.

Ha sviluppato le seguenti collaborazioni internazionali: Departimento de Ingegneria de Sistemas y Automatica, Universidad Politécnica de Valencia, Spagna (prof. J. Tornero, Dr. L. Armesto), Industrial Control Centre, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK

(prof. R. Katebi), Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida, Tampa, Florida, USA (prof. K. Valavanis), Department of Electrical and Computer Engineering, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA (prof. A. Serrani), Department of Electrical and Computer Engineering, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA (prof. C.T. Abdallah), Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic (prof. V Kucera), Dept. of Electronic Engineering, National University of Ireland (NUI) Maynooth, Ireland (Prof. John Ringwood), Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim, Norway (Prof. A. J. Sørensen), Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark (Prof. Mogens Blanke), Department of Industrial Engineering & Innovation Sciences, Eindhoven University of Technology (Dr. Ir. Raymond Cuijpers), Automation Technology Group, Department of Automation and Systems Technology, School of Electrical Engineering, Aalto University (Dr Panu Harmo).

Inoltre svolge le attività di Associate Editor delle riviste internazionali Control Engineering and Practice (Elsevier) e Journal of Intelligent and Robotic Systems (Springer). E' revisore per molteplici riviste scientifiche nei settori di interesse in precedenza richiamati.

Dall'Aprile 2007 a Dicembre 2001 e' stato amministratore unico degli spin-off universitari IDEA, Alpiquadro e 3DSupervision che operano nei settori dell'ICT applicate ai settori produttivi ed ai servizi innovativi.

Svolge attività di revisore scientifico per la valutazione di progetti di ricerca e di innovazione per il MiUR e il MiSE e per diverse Amministrazioni Regionali e Banche nazionali, oltre che per istituzioni internazionali.

E' Presidente dell'Associazione Laureati Facolta' d'Ingegneria di Ancona (ALFIA).