



Report RdS/PTR2021/XXX

Ricerca di Sistema elettrico

Analisi dei modelli matematici per la previsione dei consumi di energia in ambiti complessi quali aggregati di edifici

Agostino Gambarotta

ANALISI DEI MODELLI MATEMATICI PER LA PREVISIONE DEI CONSUMI DI ENERGIA IN AMBITI COMPLESSI QUALI AGGREGATI DI EDIFICI

Agostino Gambarotta (Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: LA 1.60 “Energy Communities: Test e ottimizzazione dei modelli per la previsione dei consumi di energia”

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Test e ottimizzazione dei modelli energetici per la previsione/misurazione di consumo energetico”*

Responsabile scientifico ENEA: Giuseppe Nigliaccio

Responsabile scientifico: Agostino Gambarotta

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 ANALISI DI SENSIBILITÀ AI PARAMETRI DEL MODELLO.....	6
2.2 IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DEL MODELLO E SENSIBILITÀ ALLE CARATTERISTICHE DEL DATASET	14
3 CONCLUSIONI	24

Sommario

In questo documento i modelli per la previsione dei fabbisogni di singoli edifici e aggregati di edifici sviluppati nell'attività della scorsa annualità sono stati sottoposti ad una analisi approfondita.

In primo luogo, è stata effettuata un'analisi di sensibilità andando a variare singolarmente i quattro parametri che caratterizzano il modello e valutando qualitativamente e quantitativamente l'influenza che tale variazione ha avuto nei profili temporali e nell'andamento della domanda prevista. Da questa analisi si è notato come il parametro più rilevante sia quello relativo agli apporti di calore, mentre quello relativo alle ventilazioni naturali ha un'influenza trascurabile.

In secondo luogo, è stata messa a punto una procedura per l'identificazione dei parametri del modello a partire dalle misurazioni di temperatura e potenza effettuabili sull'impianto. Partendo da un dataset contenente una serie temporale di misure della temperatura interna dell'edificio, della temperatura esterna e della potenza termica ceduta all'edificio nella sottostazione, e considerando lo stato di attivazione o meno della ventilazione forzata, è possibile ricavare i parametri del modello mediante una procedura di minimizzazione degli scarti tra le misure e le previsioni del calcolo. Questa procedura è stata sottoposta ad analisi andando a variare la lunghezza del periodo di monitoraggio utilizzato per l'identificazione e il periodo di campionamento. Si è notato come si possano raggiungere risultati adeguati anche con una quantità esigua di dati, come quelli raccolti per alcuni giorni con un periodo di campionamento inferiore all'ora.

1 Introduzione

Le attività di cui al presente documento si inseriscono nel Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema elettrico per quanto attiene l'Obiettivo "1. Tecnologie", tema di ricerca "1.7 Tecnologie per la penetrazione del vettore elettrico negli usi finali", con specifico riferimento al Work package "Local Energy District" e all'attività "Tecnologie per la piattaforma per le Energy Communities (LEC)".

Le attività nel loro complesso sono relative allo sviluppo e alla verifica di modelli di previsione e misurazione di consumo energetico all'interno di ambiti complessi quali aggregati di edifici o strutture produttive. L'obiettivo è quello di costruire modelli di previsione adattabili alle esigenze di gruppi omogenei di utenze, come quelli che caratterizzano le Local Energy Community. Ciò è finalizzato ad affrontare il problema dell'ottimizzazione dell'autoconsumo energetico all'interno delle Local Energy Community grazie all'utilizzo di modelli che possano fornire al sistema di gestione delle Comunità uno strumento che, permettendo la valutazione in anticipo del probabile andamento della generazione di energia all'interno della Comunità stessa, consenta di definire strategie di gestione dei flussi energetici in grado di massimizzare il ricorso a fonti di energia interne alla Comunità, anche riprogrammando la domanda interna.

In particolare, la simulazione del complesso edificio-impianto oltre a permettere di prevedere il consumo negli edifici -a differenza degli approcci basati sull'analisi delle serie storiche di dati- permette anche di valutare comparativamente diverse strategie in una logica what-if e di trarre utili indicazioni per una loro applicazione in campo. Nel caso specifico, essendo l'approccio impiegato per la simulazione degli edifici di tipo dinamico, esso permette di valutare la possibilità di accumulare energia nell'involucro edilizio stesso disaccoppiando la produzione dal mero soddisfacimento della domanda e abilitando, attraverso una limitata variazione della temperatura interna dell'edificio, una flessibilità che (tenuto conto della progressiva elettrificazione del sistema energetico in generale e quindi anche dei consumi per il condizionamento degli ambienti) potrà essere di beneficio per il sistema elettrico e permetterà un maggiore impiego di energia da fonti rinnovabili localizzate.

Dopo aver sviluppato e presentato i modelli nel report relativo alla scorsa annualità, in questa relazione il modello di rete di teleriscaldamento (pompa di calore, rete tele ed edificio) realizzato per la previsione dei fabbisogni verrà sottoposto ad analisi di sensibilità per individuare i parametri più critici e verrà valutata la possibilità di identificare i parametri del modello attraverso l'utilizzo di misure raccolte durante il monitoraggio nel funzionamento reale dell'impianto.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Analisi di sensibilità ai parametri del modello

Il modello per la previsione dei fabbisogni termici degli edifici sviluppato nella precedente annualità è stato sottoposto a una analisi di sensibilità al fine di valutare il peso dei quattro coefficienti di prestazione introdotti.

A tal proposito è utile ricordare la formulazione in Eq. (1)

$$\frac{dT_{\text{int}}}{dt} = -a \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{est}}) + b \cdot \dot{Q}_e - c \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{est}}) - d \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{air}}) \quad (1)$$

che è stata ricavata dal bilancio di energia applicato all'edificio e i cui coefficienti sono così definiti:

- a tiene in considerazione lo scambio termico attraverso le pareti

$$a = \frac{U_e \cdot A_e}{M_e \cdot C_e} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (2)$$

- b considera gli apporti di calore

$$b = \frac{1}{M_e \cdot C_e} \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{kJ}} \right] \quad (3)$$

- c tiene in considerazione l'energia scambiata attraverso la ventilazione naturale

$$c = \frac{\dot{m}_{\text{air,nat}} \cdot c_{p,\text{air,nat}}}{M_e \cdot C_e} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (4)$$

- d considera l'energia scambiata attraverso la ventilazione forzata

$$d = \frac{\dot{m}_{\text{air,forced}} \cdot c_{p,\text{air,forced}}}{M_e \cdot C_e} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (5)$$

avendo indicato con

- M_e la massa equivalente dell'edificio (che comprende sia la massa delle pareti sia la massa d'aria interna);
- C_e il calore specifico dell'edificio (valore medio tra il valore del calore specifico dell'aria interna e quello delle pareti);
- dT_{int}/dt la derivata nel tempo di T_{int} , ovvero la variazione infinitesima di temperatura interna al sistema nell'intervallo di tempo dt ;
- U_e il coefficiente di scambio termico delle pareti ed A_e è la superficie di scambio: il termine $-U_e \cdot A_e \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{est}})$ rappresenta quindi il flusso di calore scambiato attraverso i confini del sistema verso l'esterno e per questo ha segno negativo;
- \dot{Q}_e è il flusso termico in [kW] fornito all'edificio dall'impianto di riscaldamento e dagli apporti gratuiti (per esempio dovuti agli occupanti, ai dispositivi elettrici e all'irraggiamento) e per questo ha segno positivo;
- \dot{m}_{air} è la portata in massa dell'aria, $c_{p,\text{air}}$ è il calore specifico dell'aria, quindi il termine $-\dot{m}_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{air}})$ rappresenta il flusso termico scambiato a causa delle ventilazioni (sia quelle naturali, ovvero le infiltrazioni dovute a scarso isolamento, sia quelle forzate, ovvero i ricambi d'aria per mantenere adeguate le condizioni di qualità dell'aria all'interno di un edificio abitato; nel caso in cui per queste ultime sia utilizzata una unità con recupero il termine deve essere considerato separatamente in quanto la temperatura di immissione dell'aria è diversa da quella esterna).

L'analisi di sensibilità è consistita nella variazione rispetto ai parametri base utilizzati nelle simulazioni effettuate nella precedente annualità e riportati in Tabella 1. Ogni valore è stato prima aumentato e poi diminuito del 10 % rispetto al valore base. Sono state effettuate simulazioni di 4 giorni con un periodo di riscaldamento dalle ore 8 alle ore 18 di ogni giorno, intervallo nel quale è richiesta una temperatura interna di 20 °C. Per ottenere la temperatura richiesta alle ore 8 è stato prefissato un certo anticipo di accensione e quindi si ha una fase di preriscaldamento. Al di fuori di questo periodo la temperatura interna può variare liberamente.

Tabella 1. Valori base dei coefficienti prestazionali

Coefficiente	Valore	Unità di misura
a	0.0201	[h ⁻¹]
b	1.778 10 ⁻⁷	[°C kJ ⁻¹]
c	0.00896	[h ⁻¹]
d	0.01943	[h ⁻¹]

Nelle Figure 1-3 è riportato il risultato dell'analisi di sensibilità relativamente al parametro a in termini di profilo della temperatura interna all'edificio, potenza termica scambiata alla sottostazione e potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore del terzo giorno di simulazione. Come ci si poteva attendere, essendo questo parametro correlato alla dispersione di calore attraverso le pareti un suo aumento determina un aumento della potenza necessaria durante il mantenimento (Figure 2 e 3) e una riduzione della pendenza della rampa di temperatura durante la fase di preriscaldamento (Figura 1), con conseguente allungamento dei tempi di preriscaldamento.

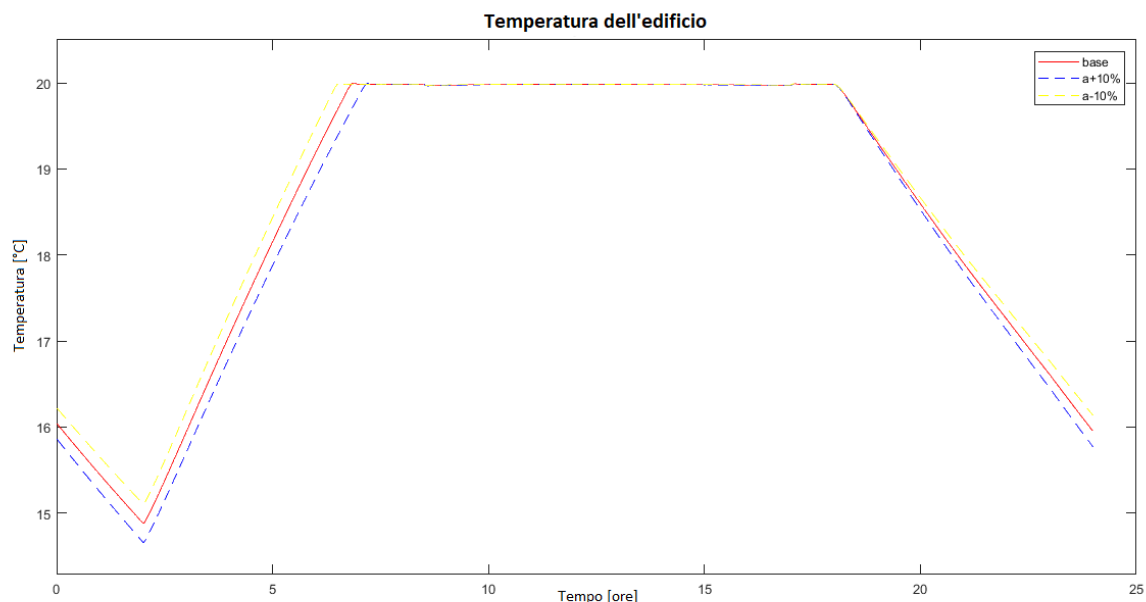


Figura 1. Andamento della temperatura interna dell'edificio al variare del parametro a

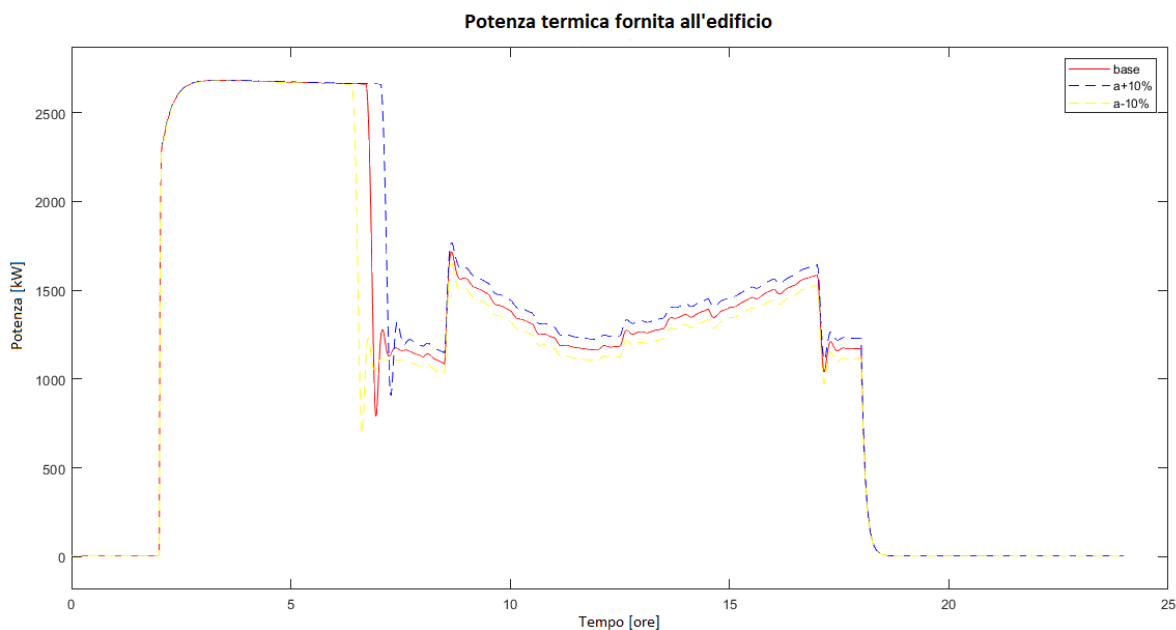


Figura 2. Andamento della potenza termica scambiata nella sottostazione dell'edificio al variare del parametro α

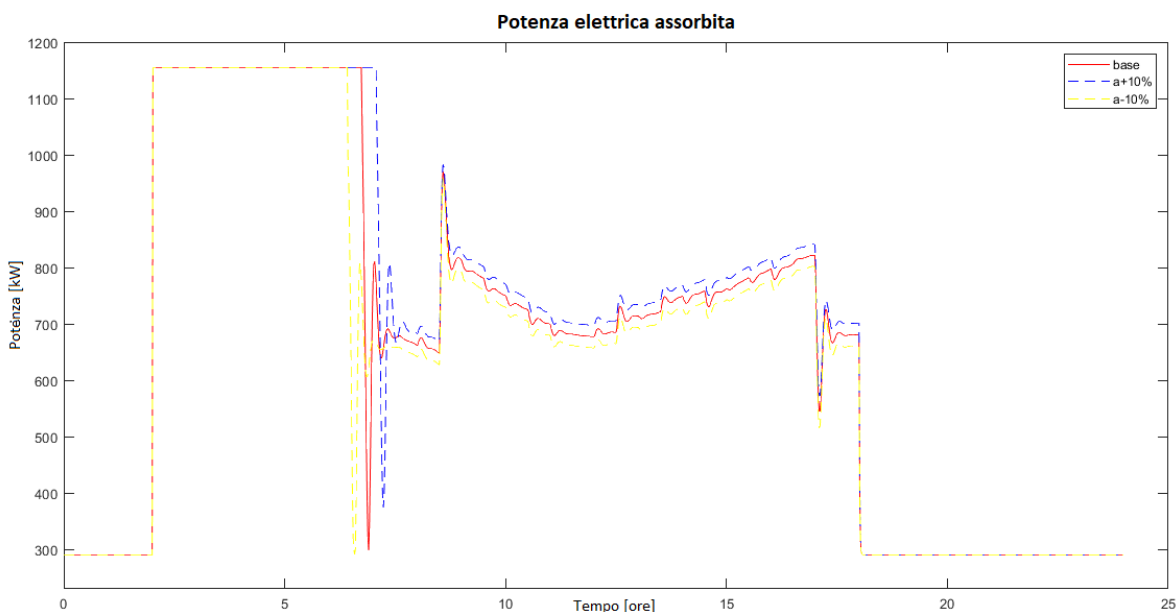


Figura 3. Andamento della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore al variare del parametro α

Nelle Figure 4-6 è riportato l'esito delle simulazioni relativamente ai profili di temperatura, potenza termica scambiata alla sottostazione e potenza elettrica in input alla pompa di calore nel caso di variazione del parametro b . Anche in questo caso i profili mostrati sono relativi al terzo giorno di simulazione. Poiché il parametro b è sostanzialmente il reciproco della capacità termica dell'edificio, si può notare come esso abbia una sostanziale influenza sul comportamento dinamico: in Figura 4 si può vedere come un aumento determini una maggior rapidità nell'incremento di temperatura durante la fase di riscaldamento. Non è possibile invece vedere un'influenza sul raffreddamento perché in quel caso b è moltiplicato per un valore nullo come si può notare da Figura 5. Durante la fase di mantenimento (dalle ore 8 alle 18) un aumento di b

fa sì che sia necessario un apporto termico minore (Figura 5) per compensare le dispersioni attraverso le pareti e le ventilazioni.

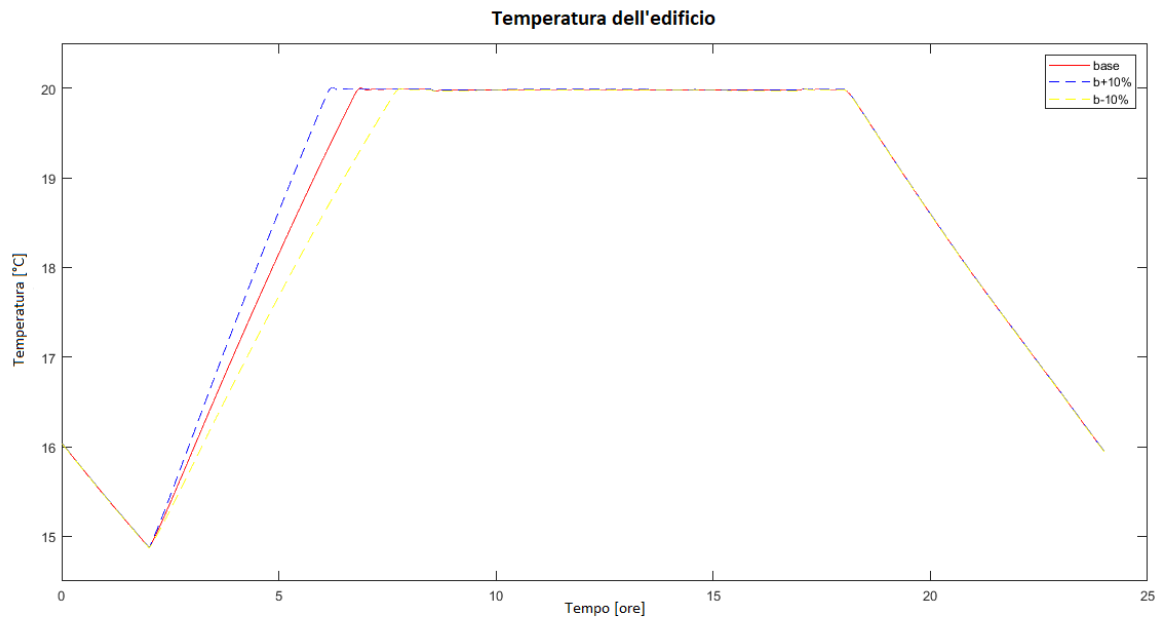


Figura 4. Andamento della temperatura interna dell'edificio al variare del parametro b

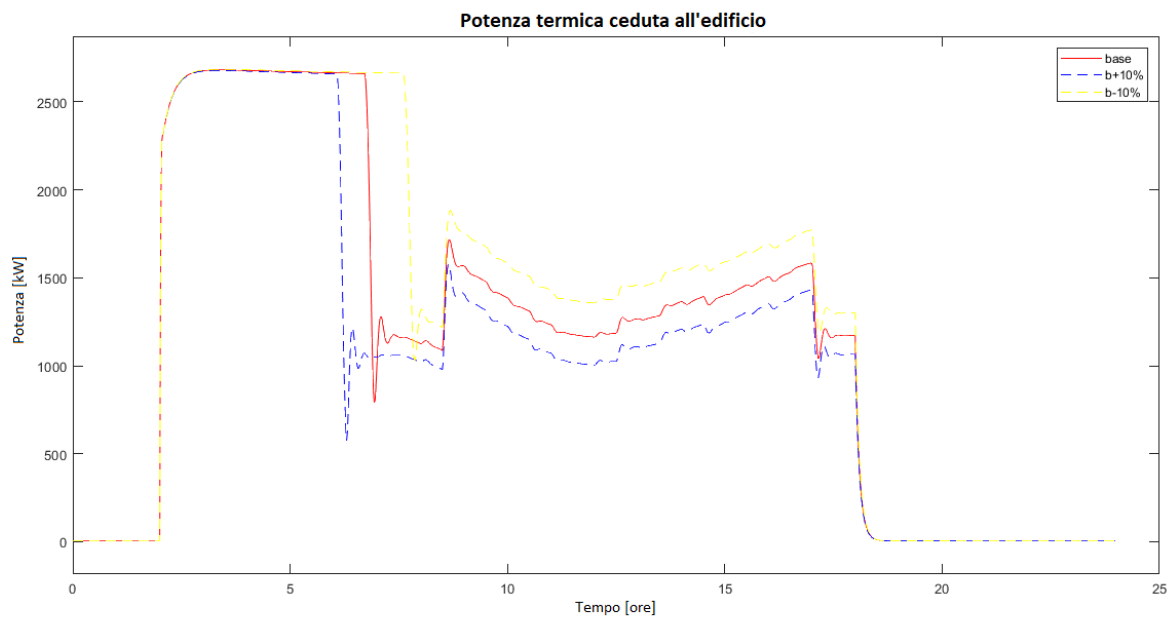


Figura 5. Andamento della potenza termica scambiata nella sottostazione dell'edificio al variare del parametro b

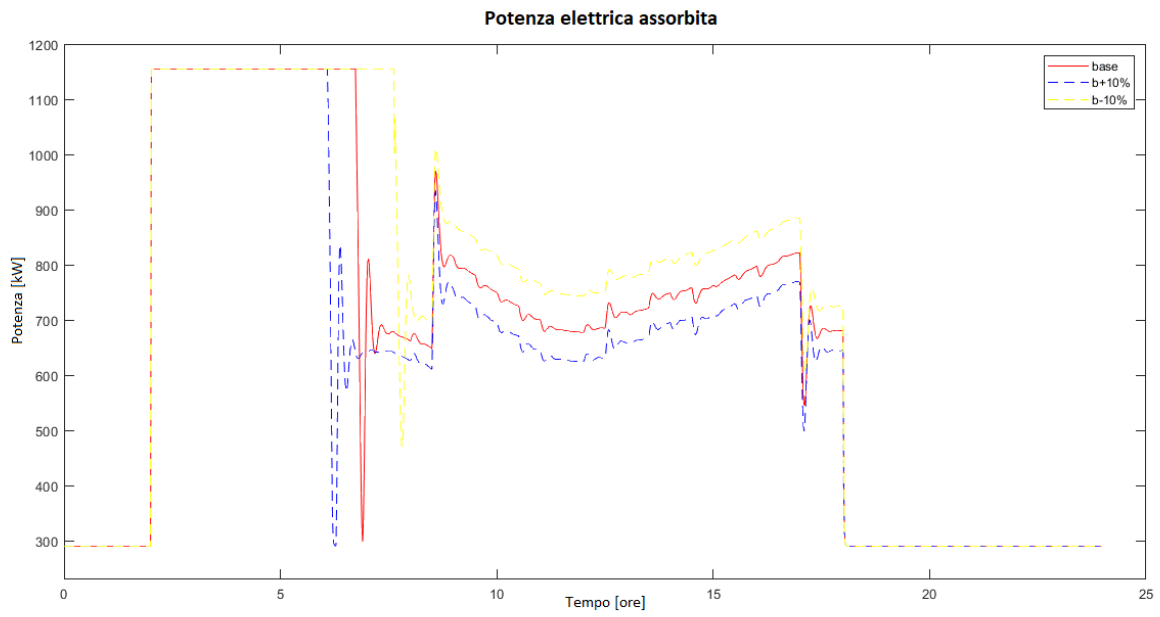


Figura 6. Andamento della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore al variare del parametro *b*

Le Figure 7-9 mostrano i profili di temperatura, potenza termica ed elettrica per la variazione del parametro *c*, cioè quello relativo alle ventilazioni naturali. È possibile notare come l'influenza della variazione di questo parametro sia qualitativamente trascurabile non essendo apprezzabile alcuna differenza tra i profili mostrati.

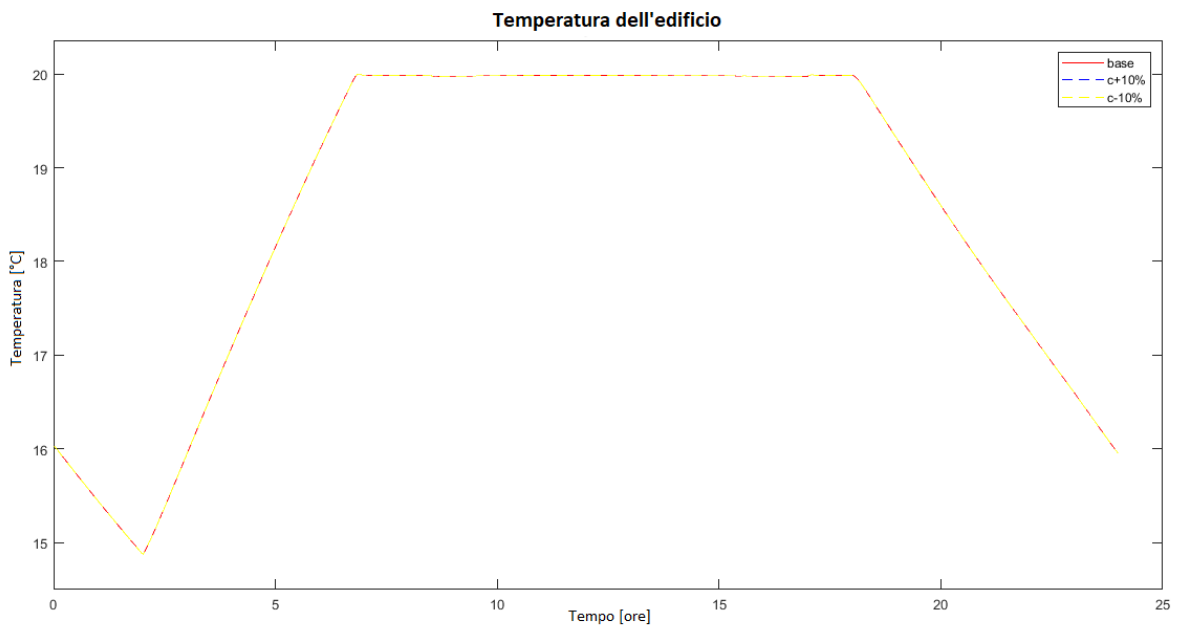


Figura 7. Andamento della temperatura interna dell'edificio al variare del parametro *c*

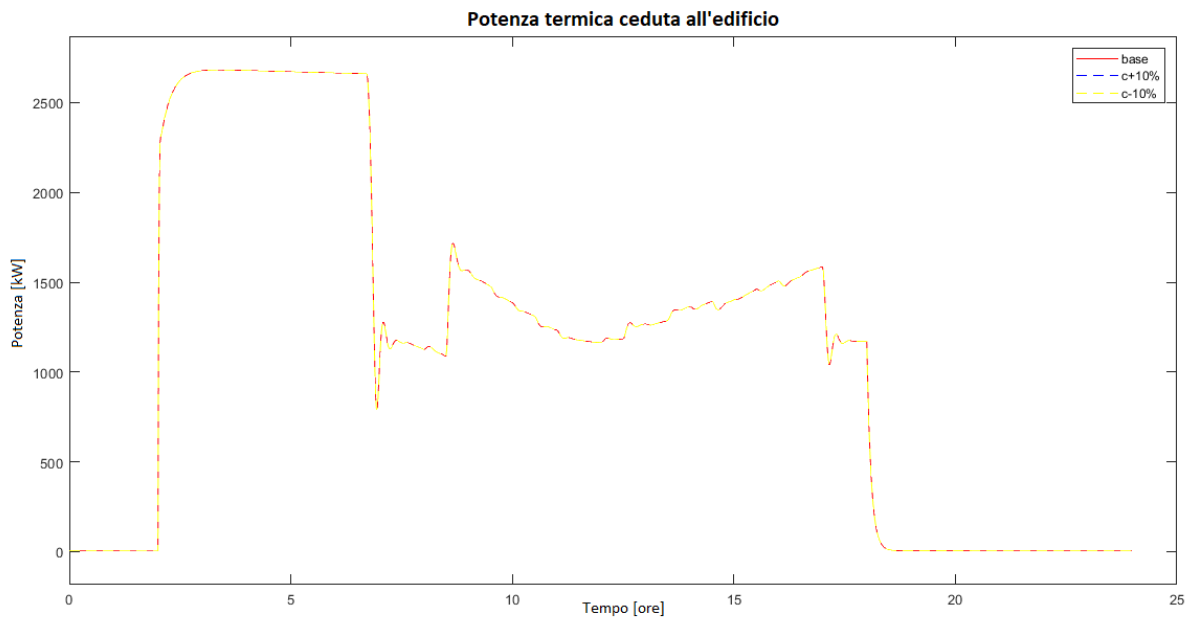


Figura 8. Andamento della potenza termica scambiata nella sottostazione dell'edificio al variare del parametro c

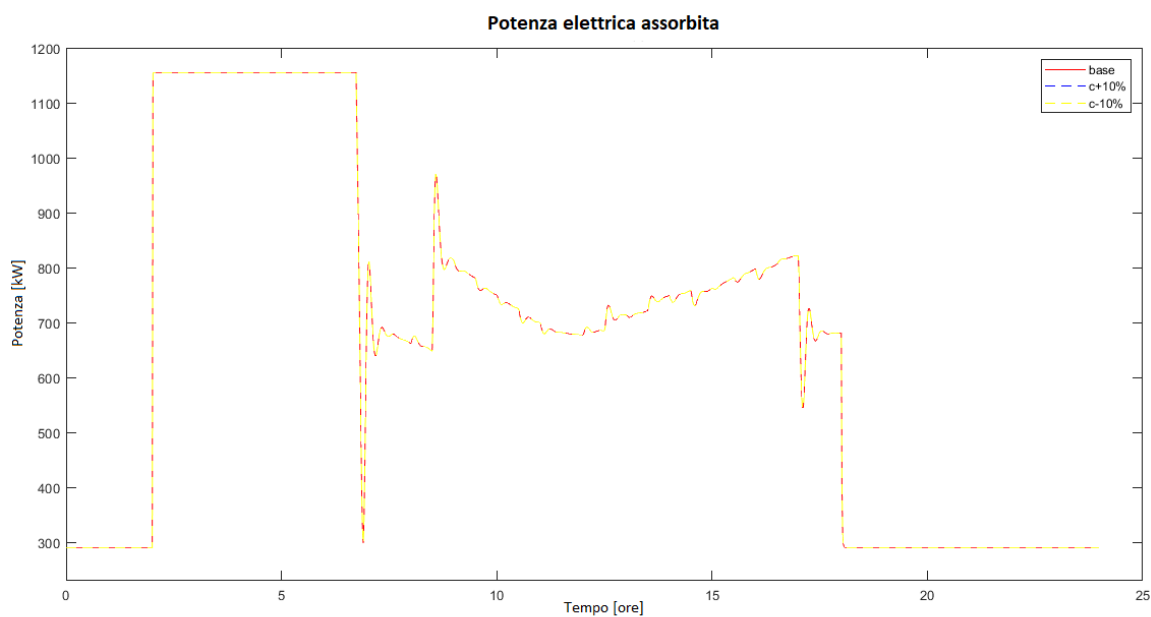


Figura 9. Andamento della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore al variare del parametro c

Nelle Figure 10-12 è riportato l'esito delle simulazioni riguardanti l'analisi di sensibilità al parametro d , cioè quello relativo alla dispersione di calore dovuta ai ricambi d'aria mediante ventilazione forzata. Questa modalità di ventilazione, a differenza di quella naturale, è attiva solo nei periodi di occupazione dell'edificio, cioè dalle ore 8 alle ore 18. Si può notare infatti come un aumento del parametro d determini un aumento del peso di queste dispersioni e conseguentemente un aumento di richiesta di potenza termica alla sottostazione (Figura 11) ed elettrica in alimentazione alla pompa di calore (Figura 12) durante le ore di mantenimento. Seppur teoricamente non ci si aspetterebbe un'influenza significativa nelle fasi di

preriscaldamento e raffreddamento, dalla Figura 10 si può notare un differente comportamento anche in questi periodi. Ciò è dovuto al fatto che a causa della maggior dissipazione dovuta alle ventilazioni forzate alla disattivazione del riscaldamento alle 18 l'acqua nel circuito di riscaldamento ha una temperatura leggermente inferiore quando d è maggiore e il calore residuo nel fluido è minore. Questo viene comunque ceduto all'edificio nel tempo. Per questo motivo per valori di d maggiori si ha una temperatura minore in fase di raffreddamento. Ciò poi ha un'influenza anche nella fase di preriscaldamento dovendo partire da temperature leggermente minori.

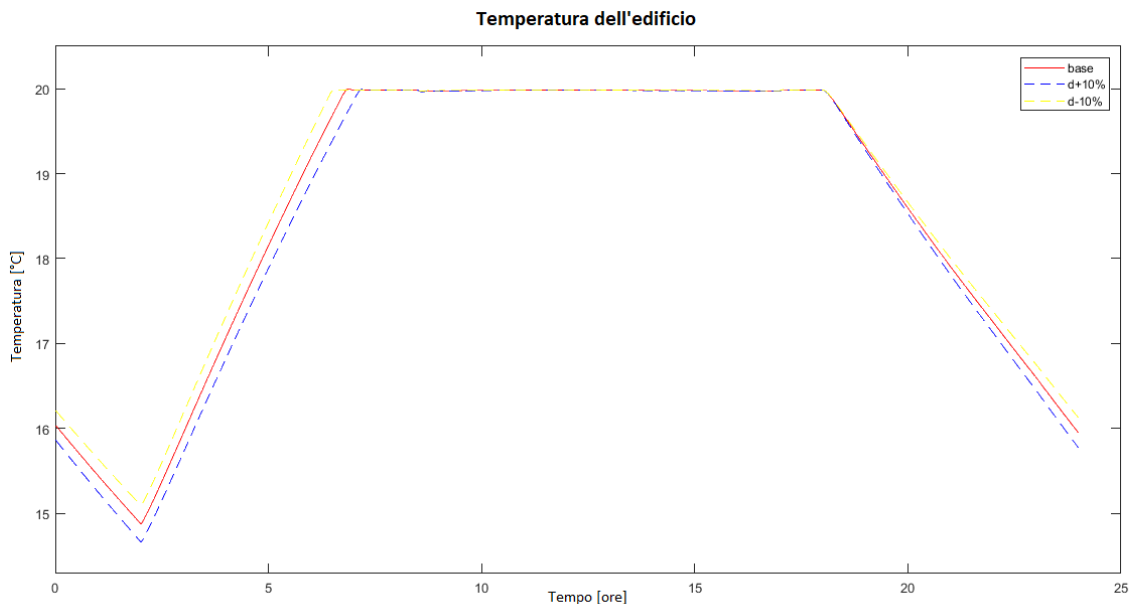


Figura 10. Andamento della temperatura interna dell'edificio al variare del parametro d

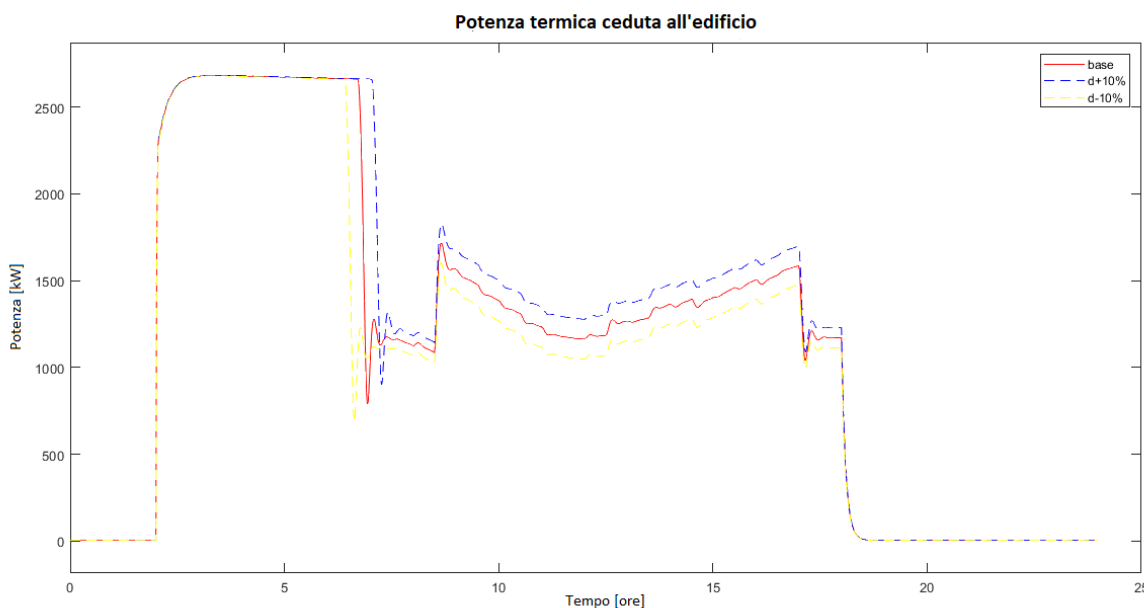


Figura 11. Andamento della potenza termica scambiata nella sottostazione dell'edificio al variare del parametro d

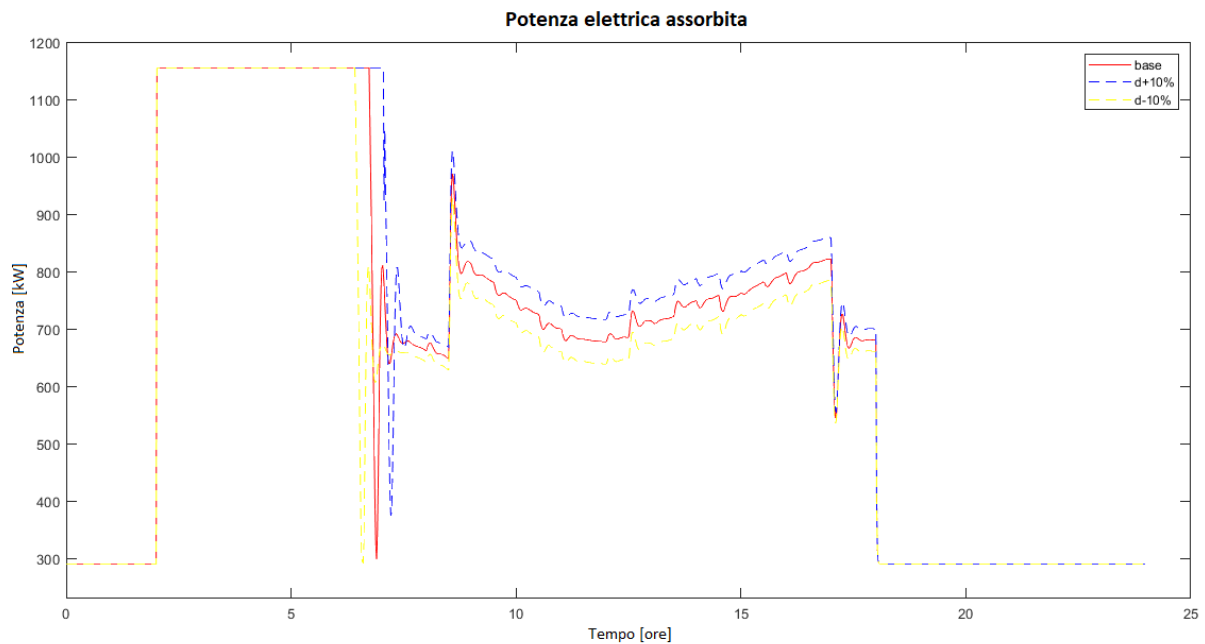


Figura 12. Andamento della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore al variare del parametro d

Infine, in Tabella 2 è riassunto l'esito dell'analisi di sensibilità ai parametri citati riportando la richiesta complessiva calcolata nella giornata simulata di energia elettrica in ingresso alla pompa di calore (E_{el}) e di energia termica scambiata alla sottostazione (E_{th}). Si può notare come un incremento di a determini un incremento del fabbisogno energetico, così come un decremento di b e un incremento di d . Il parametro c si conferma ininfluente anche dal punto di vista qualitativo. In Tabella 3 sono invece riportati i valori delle variazioni relative percentuali delle richieste energetiche rispetto al caso base. Anche da questa analisi si può notare come il parametro b sia quello con il peso più significativo.

Tabella 2. Scostamenti assoluti dei fabbisogni di energia elettrica e termica

	base	a		b		c		d	
		-10 %	+10 %	-10 %	+10 %	-10 %	+10 %	-10 %	+10 %
E_{el} [MWh]	16.01	15.62	16.39	17.08	15.12	16.01	16.01	15.47	16.54
E_{th} [MWh]	27.58	26.40	28.75	30.85	24.87	27.58	27.58	25.95	29.20

Tabella 3. Scostamenti relativi dei fabbisogni di energia elettrica e termica

	a		b		c		d	
	-10 %	+10 %	-10 %	+10 %	-10 %	+10 %	-10 %	+10 %
$\Delta E_{el}/E_{el,base}$	-2.4 %	+2.4 %	6.7 %	-5.6 %	0.0 %	0.0 %	-3.4 %	3.3 %
$\Delta E_{th}/E_{th,base}$	-4.3 %	+4.2 %	11.9 %	-9.8 %	0.0 %	0.0 %	-5.9 %	5.9 %

2.2 Identificazione dei parametri del modello e sensibilità alle caratteristiche del dataset

I parametri di prestazione del modello di edificio possono essere determinati mediante una procedura di identificazione a partire da dati sperimentali.

Nell'identificazione di un modello *grey-box* (i.e. modello basato su correlazioni derivate da leggi fisiche, e per questo motivo caratterizzate da parametri la cui identificazione richiede quantità di dati relativamente limitate), devono essere definite (i) la struttura del modello desiderata e (ii) i relativi parametri che si vuole trovare. L'algoritmo di identificazione dei parametri utilizza in ingresso il *training set*, ovvero il set di dati sperimentali da utilizzare per l'addestramento del modello, e risolve un problema ai minimi quadrati: dati il modello da identificare e il *training set*, l'approccio ai minimi quadrati minimizza la sommatoria dei quadrati delle differenze tra i dati sperimentali e i valori previsti dal modello nelle medesime condizioni. I valori dei parametri del modello per i quali tale sommatoria è minima sono restituiti come risultato dall'algoritmo.

Nel caso dell'identificazione del modello di Eq. (1), va evidenziato come la formulazione in tempo continuo usata per la simulazione debba essere modificata. Poiché l'identificazione è alimentata da misure effettuate con un certo campionamento, il modello deve essere trasformato in una funzione di stato discreta che rappresenta la variazione dello stato del sistema (i.e. la temperatura interna dell'edificio) dall'istante di tempo k all'istante di tempo $k + 1$ in funzione degli ingressi (i.e. energia termica immessa, stato operativo di accensione o spegnimento dell'unità di trattamento aria) e dei disturbi del sistema (i.e. temperatura esterna). La funzione di stato considerata in questa applicazione è rappresentata dall'Eq. (6):

$$T_{k+1} = T_k - \mathbf{a} \cdot \Delta t (T_k - T_{out,k}) + \mathbf{b} E_k - \mathbf{d} \cdot \Delta t \cdot act_k (T_k - T_{out,k}) \quad (6)$$

dove T e T_{out} sono, rispettivamente, la temperatura interna dell'edificio e la temperatura esterna, E è l'energia termica immessa nell'intervallo di tempo Δt , e act rappresenta lo stato di attivazione (on-off) dell'unità di trattamento aria e quindi della ventilazione forzata. I parametri del modello da identificare sono \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{d} , che nell'eq.(6) sono stati evidenziati in grassetto. Si può notare che si è ommesso il termine \mathbf{c} relativo alla ventilazione naturale, il cui contributo (precedentemente mostrato come trascurabile) può comunque essere considerato come inglobato nel contributo relativo al coefficiente \mathbf{a} . Inoltre, si considera che non ci sia recupero termico nell'ambito della ventilazione forzata, e che quindi la temperatura di immissione dell'aria sia pari a quella dell'ambiente esterno (nel caso in cui vi fosse recupero termico la temperatura dell'aria sarebbe un ulteriore dato necessario all'identificazione).

I dati necessari per la procedura di identificazione sono riportati in Tabella 4. Va sottolineato come, dalla funzione di stato del modello e dalle unità di misura dei dati, i coefficienti \mathbf{a} e \mathbf{d} saranno espressi in [1/s]. Una volta terminata l'identificazione, questi possono essere facilmente convertiti in [1/h].

Tabella 4. Dati sperimentali necessari per la procedura di identificazione

Dato	Tipo di dato	Simbolo	Unità di misura
Temperatura interna dell'edificio	Vettore	T	[°C]
Temperatura esterna	Vettore	T_{out}	[°C]
Energia termica immessa nell'intervallo di tempo	Vettore	E	[kJ]
Attivazione dell'unità di trattamento aria	Vettore binario [0/1]	act	-
Intervallo di tempo (time-step)	Scalare	Δt	[s]

L'implementazione in ambiente MATLAB® è stata svolta tramite la funzione *idnlgrey*. Le fasi della procedura di identificazione sono le seguenti:

- **Selezione del training set** in base all'ampiezza desiderata.
- **Preparazione dei dati** in accordo con la sintassi del codice per l'utilizzo della funzione *idnlgrey*. Per far ciò:
 - Si crea un oggetto *iddata* caratterizzato dai segnali in uscita dal modello (i.e. temperatura interna al time-step successivo) e dai segnali in ingresso al modello (i.e. energia termica, attivazione della ventilazione forzata e temperatura esterna al time-step attuale);

- Si definiscono le proprietà di un oggetto *idnlgrey*, caratterizzato dalla funzione modello da identificare, il relativo numero di uscite, ingressi, stati e parametri, lo stato iniziale (i.e. temperatura interna all'inizio del dataset) e i valori di primo tentativo dei parametri.
- La funzione modello da identificare deve essere definita in una funzione separata, avente come ingressi i parametri *a*, *b* e *d*, poiché deve essere richiamata dal solutore durante la risoluzione del problema.
- **Identificazione e stima dei parametri del modello.** Tramite la funzione *nlgreyest*, viene chiamato un solutore che risolve il problema ai minimi quadrati del modello *idnlgrey* con i dati *iddata*. Come ci si aspetta, si ottengono i valori dei parametri *a*, *b* e *d* che minimizzano lo scarto quadratico medio tra il set di dati sperimentali selezionato e i risultati restituiti dal modello nelle stesse condizioni.

Il listato MATLAB® impiegato per l'intera procedura di identificazione e l'ottenimento dei parametri del modello di edificio è riportato nel box sottostante, nel quale si possono riconoscere tutte le fasi descritte precedentemente.

```

%% Identificazione del modello grey box

% Dataset misurato - Creazione dei seguenti vettori (campionamento: dt):
% T_b_misurata: temperatura interna dell'edificio misurata
% E_th_misurata: energia termica ceduta all'edificio nell'intervallo di tempo
% Segnale_attivazione: segnale di attivazione della ventilazione forzata
% T_out: temperatura ambiente esterno
% dt: campionamento [s]
% N_hours: durata monitoraggio [h]

% Selezione del time-step e del training set

N1 = 1; % Inizio del training set
N2 = 3600*N_hours/dt; % Fine del training set

% Selezione del training set
T_idnt = T_b_misurata(N1:N2);
u1_idnt = E_th_misurata(N1:N2-1);
u2_idnt = Segnale_attivazione(N1:N2-1);
u3_idnt = T_out(N1:N2-1);

% Temperatura iniziale
T_in = T_idnt(1); % [°C]

%% Identificazione del modello grey box
% Creazione iddata object con segnali in uscita e in ingresso nel dominio del tempo
y_signal = [T_idnt(2:end)'];
u_signal = [u1_idnt',u2_idnt',u3_idnt'];
data_idnt = iddata(y_signal,u_signal,dt);

% Settare proprietà per l'oggetto idnlgrey
FileName = 'DP_model_idnt';
Order = [1,3,1]; % [Ny,Nu,Nx]
Parameters = [0,0,0,dt]; % [a,b,d,dt]
InitialState = T_in;
TimeStep = dt;

% Identificazione e stima dei parametri
sys = idnlgrey(FileName,Order,Parameters,InitialState,TimeStep);
sys.Parameters(4).Fixed = 1;
sys = nlgreyest(data_idnt,sys);
par = sys.Report.Parameters.ParVector;

% Ottenimento nuovi parametri
a = par(1); % [1/s]
a = a*3600; % [1/h]
b = par(2); % [°C/kJ]
d = par(3); % [1/s]
d = d*3600; % [1/h]

```

La funzione modello che viene richiamata dall’algoritmo di identificazione è invece riportata nel seguente box:

```
function [dx,y] = DP_model_idnt(t,x,u,a,b,c,dt,varargin)
dx = x(1) - a.*(x(1) - u(3)).*dt + b.*u(1) + c.*u(2).*(x(1) - u(3)).*dt;
y = dx;
end
```

Selezionando opportunamente l’ampiezza del time-step di campionamento dei dati e l’ampiezza del training set (in numero di ore) usato per svolgere la procedura, è possibile fare un’analisi di sensibilità dei risultati dell’identificazione rispetto a tali parametri.

I dataset su cui effettuare l’identificazione sono stati generati sovrapponendo un rumore gaussiano ai dati prodotti attraverso il modello di simulazione della rete di teleriscaldamento descritto nella relazione dell’annualità precedente. In questo modo sono stati riprodotti in maniera più agevole i risultati di misurazioni che altrimenti sarebbero dovute risultare dal monitoraggio di un impianto reale.

I risultati di questa procedura sono riportati nelle Figure 13-15 per un dataset di 10 giorni con un campionamento di 1 h. In Figura 16 è invece riportato il profilo di attivazione della ventilazione forzata.

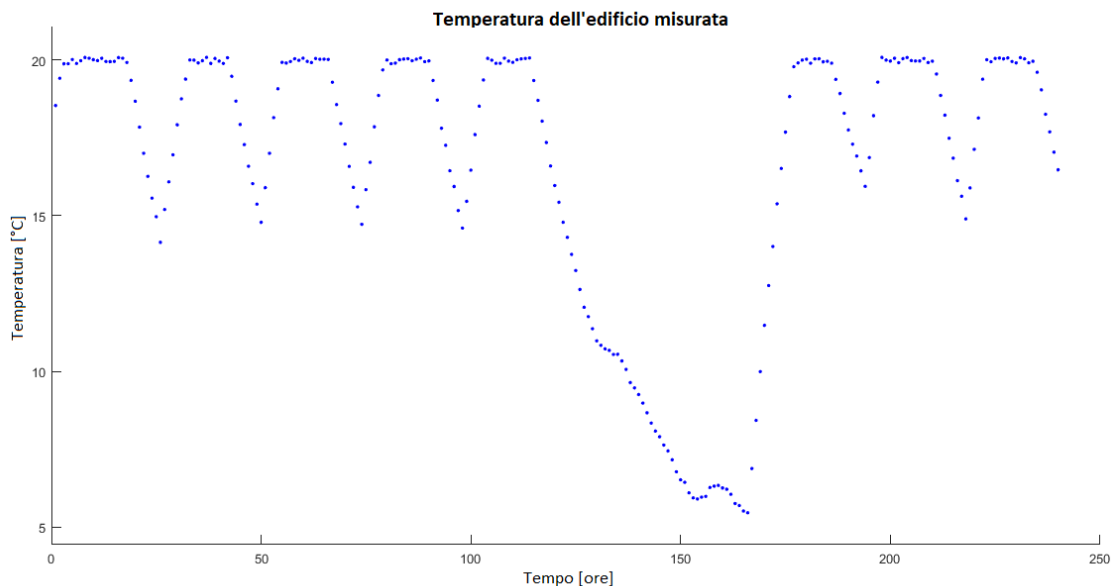


Figura 13. Dataset della temperatura interna dell’edificio per 10 giorni con campionamento 1 h.

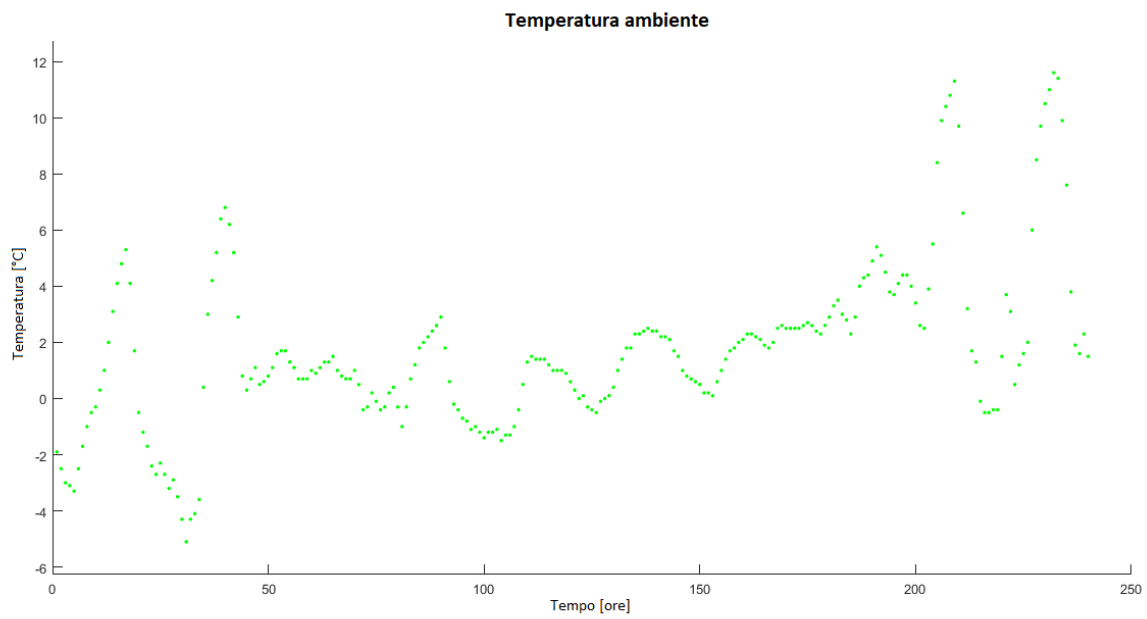


Figura 14. Dataset della temperatura dell'ambiente esterno per 10 giorni con campionamento 1 h.

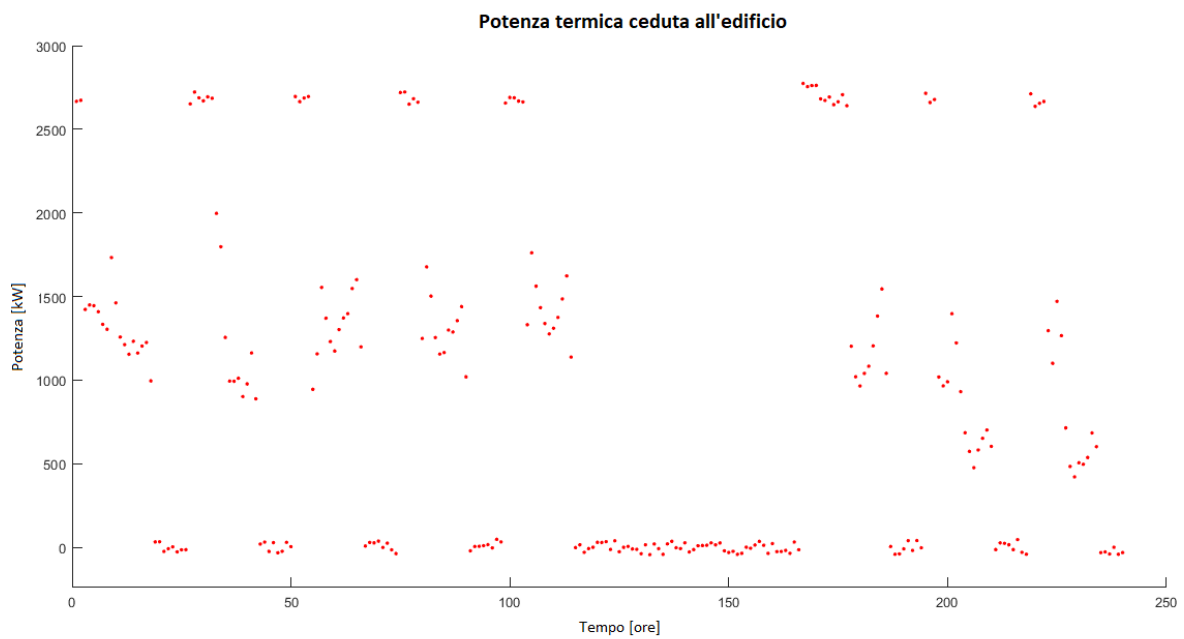


Figura 15. Dataset di potenza termica ceduta all'edificio per 10 giorni con campionamento 1 h.

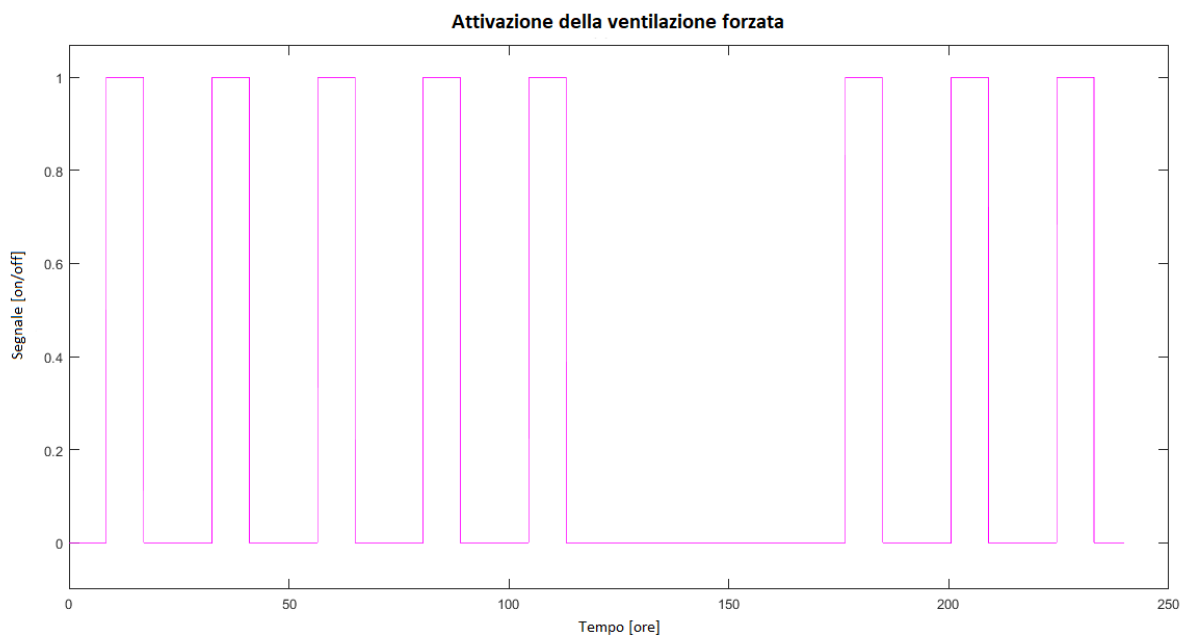


Figura 16. Profilo di attivazione della ventilazione forzata per 10 giorni.

Per valutare la robustezza della procedura di identificazione e la sensibilità alle caratteristiche del dataset sono state effettuate diverse prove variando il numero di ore di monitoraggio utilizzate per l’identificazione (da un minimo di 6 h a un massimo di 240 h) e il periodo del campionamento (15 min, 30 min, 1 h e 2 h). La dimensione del dataset varia quindi da un minimo di 3 valori per il monitoraggio di 6 ore con periodo di due ore, a un massimo di 960 valori per un monitoraggio di 240 ore con periodo di campionamento di 15 min. In Tabella 5 sono riportati i risultati dell’identificazione relativamente al periodo di campionamento di 1 h per diverse lunghezze del periodo di monitoraggio. Si può notare come i parametri raggiungano una sostanziale convergenza attorno alle 96 ore di ampiezza dell’intervallo di monitoraggio, ma anche come i parametri ottenuti si discostino dai valori di riferimento riportati in testa alla tabella: il parametro a relativo alle dispersioni attraverso le pareti è sovrastimato, mentre d , quello relativo alla ventilazione forzata è sottostimato.

Il comportamento è sostanzialmente confermato anche in Tabella 6 per il periodo di campionamento di 15 min e in Tabella 7 per quello di 30 min. Il campionamento di 2 ore riportato in Tabella 8 restituisce invece risultati di peggior qualità.

Lo scostamento rispetto ai valori attesi è sicuramente dovuto al “rumore” con il quale sono stati “sporcati” i risultati delle simulazioni al fine di emulare l’incertezza di misura, ma anche al fatto che l’identificazione assume che l’unico apporto energetico nell’edificio sia quello dovuto al riscaldamento, mentre nella simulazione (come nella realtà) sono presenti anche gli apporti gratuiti dovuti, per esempio, all’occupazione, ai dispositivi elettrici/elettronici e all’irraggiamento solare.

Tabella 5. Risultati dell'identificazione con dataset caratterizzati da periodo di campionamento di 1 h

Riferimento	0.0201	1.78E-07	0.01943
Monitoraggio [h]	a [1/h]	b [°C/kJ]	d [1/h]
6	0.04354125	1.74E-07	0.00000000
12	0.03180603	1.41E-07	0.00452090
18	0.03162160	1.40E-07	0.00353032
24	0.04744318	1.94E-07	0.00241427
36	0.03446375	1.63E-07	0.01276398
48	0.03731138	1.72E-07	0.01033790
60	0.03527036	1.68E-07	0.01244871
72	0.03672788	1.74E-07	0.01171717
84	0.03555619	1.71E-07	0.01258790
96	0.03656447	1.74E-07	0.01219522
108	0.03563935	1.72E-07	0.01298944
120	0.03624812	1.75E-07	0.01301590
132	0.03818559	1.82E-07	0.01293206
144	0.03535571	1.72E-07	0.01410920
156	0.03486906	1.71E-07	0.01439169
168	0.03279648	1.64E-07	0.01609045
180	0.03262763	1.78E-07	0.02428948
192	0.03333982	1.82E-07	0.02438678
204	0.03335816	1.83E-07	0.02450298
216	0.03374563	1.84E-07	0.02376869
228	0.03360123	1.83E-07	0.02392870
240	0.03378119	1.84E-07	0.02343460

Tabella 6. Risultati dell'identificazione con dataset caratterizzati da periodo di campionamento di 15 min

Riferimento	0.0201	1.78E-07	0.01943
Monitoraggio [h]	a [1/h]	b [°C/kJ]	d [1/h]
6	0.04663209	2.01E-07	0.00000000
12	0.04288834	1.90E-07	0.00729980
18	0.04311205	1.91E-07	0.00484085
24	0.04272124	1.90E-07	0.00563272
36	0.03916554	1.78E-07	0.00753845
48	0.03991225	1.81E-07	0.00673554
60	0.03919403	1.79E-07	0.00717328
72	0.03943480	1.80E-07	0.00758992
84	0.03924114	1.79E-07	0.00752521
96	0.03948954	1.80E-07	0.00764828
108	0.03922547	1.79E-07	0.00766321
120	0.03923587	1.80E-07	0.00818647
132	0.03948623	1.81E-07	0.00829068
144	0.03604086	1.69E-07	0.00993827
156	0.03535464	1.67E-07	0.01038311
168	0.03351496	1.61E-07	0.01204293
180	0.03361098	1.73E-07	0.01874848
192	0.03459026	1.78E-07	0.01876761
204	0.03463270	1.78E-07	0.01892343
216	0.03503847	1.80E-07	0.01811488
228	0.03499037	1.79E-07	0.01811740
240	0.03513667	1.80E-07	0.01767368

Tabella 7. Risultati dell'identificazione con dataset caratterizzati da periodo di campionamento di 30 min

Riferimento	0.0201	1.78E-07	0.01943
Monitoraggio [h]	a [1/h]	b [°C/kJ]	d [1/h]
6	0.04469545	1.86E-07	0.00000000
12	0.03678343	1.64E-07	0.00737190
18	0.03718686	1.65E-07	0.00457933
24	0.04390950	1.88E-07	0.00438315
36	0.03755941	1.72E-07	0.00942814
48	0.03914483	1.77E-07	0.00776605
60	0.03801487	1.75E-07	0.00889931
72	0.03872552	1.78E-07	0.00877637
84	0.03817649	1.76E-07	0.00911661
96	0.03868266	1.78E-07	0.00901579
108	0.03814699	1.77E-07	0.00936124
120	0.03837203	1.78E-07	0.00968827
132	0.03907282	1.81E-07	0.00973643
144	0.03580267	1.69E-07	0.01125080
156	0.03518956	1.67E-07	0.01163910
168	0.03325206	1.61E-07	0.01336685
180	0.03328289	1.74E-07	0.02075044
192	0.03421734	1.79E-07	0.02075967
204	0.03425993	1.79E-07	0.02092234
216	0.03466862	1.81E-07	0.02012162
228	0.03459054	1.80E+08	0.02019377
240	0.03474288	1.81E-07	0.01975466

Tabella 8. Risultati dell'identificazione con dataset caratterizzati da periodo di campionamento di 2h

Riferimento	0.0201	1.78E-07	0.01943
Monitoraggio [h]	a [1/h]	b [°C/kJ]	d [1/h]
6	0.02449408	8.77E-08	0.00000000
12	0.01072449	5.01E-08	0.00207331
18	0.01021637	4.84E-08	0.00255905
24	0.05104768	1.87E-07	-0.00191074
36	0.02582484	1.26E-07	0.01955505
48	0.03114987	1.45E-07	0.01457495
60	0.02756912	1.39E-07	0.01953336
72	0.03062140	1.49E-07	0.01643382
84	0.02859518	1.45E-07	0.01885178
96	0.03058118	1.52E-07	0.01721381
108	0.02898880	1.48E-07	0.01913511
120	0.03026683	1.53E-07	0.01827261
132	0.03531207	1.73E-07	0.01822950
144	0.03407757	1.69E-07	0.01861484
156	0.03405715	1.69E-07	0.01863187
168	0.03176885	1.60E-07	0.01991681
180	0.03151734	1.79E-07	0.03214843
192	0.03218399	1.82E-07	0.03207904
204	0.03215074	1.83E-07	0.03220351
216	0.03252125	1.84E-07	0.03146805
228	0.03217912	1.83E-07	0.03186367
240	0.03237806	1.83E-07	0.03133402

In Tabella 9 sono riportati i risultati delle stime di fabbisogno effettuate utilizzando i coefficienti ricavati attraverso la procedura di identificazione. Il fabbisogno è stato calcolato simulando i dieci giorni considerati e calcolando la domanda di energia degli ultimi 5 giorni. Si può notare come un aumento del periodo di campionamento riduca determini un aumento dell'errore nel caso di periodo di monitoraggio di 96 ore, mentre nel caso di periodo di sole 6 ore il modello prima sottostima la domanda per poi sovrastimarla al crescere del periodo di campionamento.

Tabella 9. Confronto tra le richieste calcolate mediante i modelli ottenuti dall'identificazione e quelle di riferimento

		Riferim.	15 min		30 min		1 h		2 h	
			6 h	96 h	6 h	96 h	6 h	96 h	6 h	96 h
E_{el}	[MWh]	61.00	57.63	61.89	58.67	62.68	59.95	64.31	66.75	68.96
E_{th}	[MWh]	80.95	70.85	84.02	74.12	86.47	78.12	91.48	99.47	106.05
ΔE_{el}	[MWh]	-	-3.37	0.89	-2.33	1.69	-1.05	3.31	5.75	7.96
ΔE_{th}	[MWh]	-	-10.11	3.07	-6.83	5.52	-2.84	10.53	18.51	25.10
$\Delta E_{el}/E_{el.rif}$	[%]	-	-6	1	-4	3	-2	5	9	13
$\Delta E_{th}/E_{th.rif}$	[%]	-	-12	4	-8	7	-4	13	23	31

Per dimostrare che la procedura di identificazione opera correttamente anche quando è disponibile la sola potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore che alimenta l'edificio (anziché la potenza termica ceduta a esso), l'identificazione è stata ripetuta utilizzando la potenza elettrica come dato in ingresso. In maniera

analoga, il dataset di potenza elettrica è stato ottenuto tramite la sovrapposizione di un rumore gaussiano ai dati ottenuti dalla simulazione, in modo da rappresentare misure potenzialmente risultanti dal monitoraggio di un impianto reale.

A titolo esemplificativo, viene riportato in Tabella 10 il risultato ottenuto con un tempo di campionamento di 1 h e con un training set di 96 h.

Tabella 10. Risultati dell'identificazione con la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore come dato in ingresso (periodo di campionamento di 1 h).

Riferimento	0.0201	1.78E-07	0.01943
Monitoraggio [h]	a [1/h]	b [°C/kJ]	d [1/h]
96	0.07228538	5.76E-07	0.01460114

Si può notare che i risultati della procedura di identificazione realizzata utilizzando a potenza elettrica differiscono in maniera significativa rispetto a quelli ottenuti partendo dalla potenza termica. In particolare, il valore del coefficiente b ottenuto con la potenza elettrica assorbita come ingresso risulta essere circa 3 volte maggiore del valore ottenuto con la potenza termica ceduta. Ciò può essere spiegato dal fatto che considerare in ingresso la potenza elettrica implica inglobare in b anche il coefficiente di prestazione (COP) della pompa di calore, caratteristico della conversione da potenza elettrica assorbita a potenza termica ceduta. Quindi il risultato ottenuto è in accordo con quanto ci si aspetta, mostrando la robustezza della procedura di identificazione proposta.

3 Conclusioni

In un contesto energetico di transizione i metodi tradizionali di previsione della domanda termica degli edifici basati sull'analisi delle serie storiche dei consumi possono non essere adatti a rispondere alle nuove esigenze emergenti. In particolare, di fronte alla progressiva elettrificazione degli usi finali e al continuo incremento della produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile non programmabile, agli edifici può essere richiesta una significativa flessibilità anche nell'ambito del soddisfacimento dei fabbisogni termici, naturalmente senza compromettere il comfort degli occupanti.

È quindi utile disporre di un modello dinamico dell'edificio che tenga conto della sua capacità termica e possa quindi simularne il conseguente comportamento dinamico. Nell'ambito dell'attività presentata, è stato quindi proposto un modello a parametri concentrati dell'edificio partendo dall'equazione di bilancio dell'energia. Con questo modello è possibile prevedere i fabbisogni termici noti i disturbi (la temperatura esterna e gli apporti gratuiti per occupazione e irraggiamento) e le condizioni operative (temperatura interna desiderata e ricambi d'aria), ma anche valutare le dinamiche di variazione della temperatura interna e quindi di accumulo e cessione di energia.

Attraverso un'analisi di sensibilità è stata valutata sia qualitativamente sia quantitativamente l'influenza della variazione dei quattro parametri caratteristici del modello sulle previsioni dello stesso. Ognuno dei parametri è stato variato singolarmente, incrementandolo o decrementandolo del 10 %, e sono stati analizzati i profili di temperatura interna dell'edificio, di potenza termica ceduta all'edificio e di potenza elettrica in alimentazione della pompa di calore per un giorno di simulazione. È stato inoltre valutato come la variazione del parametro influisca sulla previsione del fabbisogno di energia termica ed elettrica per il giorno in oggetto. È stato possibile notare come il parametro che ha la maggior influenza (e che quindi deve essere quantificato con maggior accuratezza) sia quello relativo agli apporti di calore, mentre quello meno influente sia quello relativo alle ventilazioni naturali.

È stata successivamente valutata la possibilità di quantificare i parametri del modello attraverso misurazioni derivanti dal monitoraggio dell'impianto. Sono stati generati dataset attraverso la sovrapposizione di un rumore gaussiano ai risultati della simulazione in termini di potenza ceduta all'edificio, temperatura interna e temperatura esterna, volendo in questo modo emulare i dati tipicamente forniti da un sistema di monitoraggio del sistema impianto-utenza. I dataset generati differiscono per il periodo di campionamento (da 15 min a 2 ore) e sono stati utilizzati per identificare i parametri del modello attraverso una procedura basata sulla minimizzazione dello scarto tra le misure e le previsioni del modello. Oltre all'effetto del periodo di campionamento, è stata valutata anche l'influenza della lunghezza del periodo di monitoraggio andando a utilizzare per l'identificazione i dati ricavati da un periodo che va da un minimo di 6 ore a un massimo di 240 ore (10 giorni). Si è notato come un periodo di monitoraggio di alcuni giorni con un intervallo di campionamento non superiore ad 1 ora sia sufficiente a ottenere risultati adeguati e come la capacità predittiva del modello aumenti con la diminuzione del periodo di campionamento.

Il modello proposto può essere quindi utilizzato in sistemi per la pianificazione della gestione dell'energia e può essere identificato attraverso il monitoraggio di poche grandezze normalmente quantificate. Automatizzando la procedura di identificazione il modello potrà essere anche valutato come strumento di diagnostica del sistema impianto-edificio.

Appendice – Curriculum Scientifico del gruppo di lavoro

Agostino Gambarotta

- Laureato in Ingegneria Meccanica con il massimo dei voti e con lode presso l'Università di Genova nel dicembre 1985; iscritto all'Albo degli Ingegneri della Provincia di Genova dal 1985.
- Dottore di Ricerca in Energetica (dottorato consortile tra il Politecnico di Milano e l'Università di Genova) nel settembre 1990.
- Ricercatore presso l'Università di Genova dal 1990 al 1992.
- Professore Associato di "Sistemi per l'Energia e l'Ambiente" presso l'Università di Bologna dal 1992 al 1994, e presso l'Università di Genova dal 1994 al 2002.
- Professore Ordinario di "Macchine a Fluido" presso l'Università di Parma dal 2002.
- Membro dell'American Society of Mechanical Engineers (ASME) e della Society of Automotive Engineers (SAE).
- Reviewer per: American Society of Mechanical Engineers (ASME); Society of Automotive Engineers (SAE); International Federation of Automatic Control (IFAC); Institution of Mechanical Engineers (I.Mech.E.).
- Reviewer per le seguenti riviste scientifiche: Journal of Energy and Fuels (ACS); Journal of Energy, Journal of Energy Conversion and Management, Fuel, Advances in Engineering Software, Applied Energy, Control Engineering Practice, edite da Elsevier; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Journal of Testing and Evaluation dell'American Institute of Physics; Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles; International Journal of Engine Research.
- Direttore del Centro Interdipartimentale per l'Energia e l'Ambiente (CIDEA) dell'Università di Parma (www.centritecnopolo.unipr.it/cidea).
- Responsabile scientifico per l'Università di Parma di progetti di ricerca finanziati sui fondi POR-FESR della Regione Emilia-Romagna (tra i più recenti E-CO2 ed ENERGYNIUS).
- Responsabile scientifico per l'Università di Parma nell'ambito di diverse convenzioni di ricerca con industrie nazionali.
- Referente per l'Università di Parma presso il Cluster Tecnologico Nazionale Energia.
- Valutatore per diversi soggetti pubblici di progetti di ricerca applicata ai sistemi energetici per lo sviluppo sostenibile, tra i quali: Regione Piemonte, Regione Puglia, Università di Padova, Università di Modena e Provincia autonoma di Trento per progetti di ricerca applicata ai sistemi energetici per lo sviluppo sostenibile.

L'attività scientifica è rivolta a due principali tematiche:

- Ottimizzazione ed integrazione dei Sistemi Energetici, con particolare riguardo agli aspetti legati alla modellazione dei sistemi energetici finalizzata alla ottimizzazione delle prestazioni e delle strategie di gestione, alla riduzione dei consumi di energia primaria ed all'impatto ambientale, al miglioramento delle efficienze di conversione, allo sviluppo di sistemi di controllo ottimizzati applicati alle reti energetiche, agli impianti ORC (Organic Rankine Cycle), ai sistemi cogenerativi e trigenerativi, agli impianti a fonti energetiche rinnovabili.
- Motori a Combustione Interna (MCI), con particolare riguardo al miglioramento delle prestazioni, dei consumi, e delle emissioni inquinanti dei motori automobilistici: in questo campo la ricerca sia sperimentale che teorica ha portato allo sviluppo di metodologie per la simulazione "real-time" di

motori automobilistici finalizzate alla progettazione delle strategie di controllo e diagnostica ed alla ottimizzazione del funzionamento dei sistemi di post-trattamento dei gas di scarico.

I risultati dell'attività scientifica sono sintetizzati in più di 110 pubblicazioni presentate a congressi nazionali ed internazionali o pubblicate su riviste internazionali e nazionali.