

UNIVERSITÀ DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA

Algoritmi per la previsione del carico in applicazioni HVAC

Laureando: Francesco Simmini

Relatore: Ch.mo Prof. Alessandro Beghi

Correlatore: Dr. Ing. Luca Cecchinato

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA
IN INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE

Anno Accademico 2009/2010

19 Aprile 2010

Sommario

Il lavoro si pone come obiettivo l'applicazione di metodi e algoritmi per la previsione del carico in sistemi HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning). La previsione risulta utile per il risparmio energetico durante il periodo caldo dell'anno. Infatti al fine di ridurre la richiesta di raffreddamento durante il periodo diurno e i costi energetici del sistema, è possibile utilizzare un accumulo frigorifero: questa tecnica consiste nella produzione durante il periodo notturno di tutta o di una parte dell'energia frigorifera richiesta durante il periodo diurno. L'energia frigorifera può essere accumulata sotto forma di acqua refrigerata o di ghiaccio. Per quantificare l'energia da accumulare durante il periodo notturno è necessaria una previsione del carico per le ore diurne successive. La previsione viene elaborata utilizzando principalmente tecniche di identificazione e reti neurali artificiali. Diverse prove simulative verificano la qualità della previsione ottenuta con gli algoritmi utilizzati.

Indice

1	Introduzione	1
2	Sistemi HVAC	5
2.1	Componenti di un sistema HVAC	5
2.2	Il ciclo frigorifero	13
2.3	Compressori	15
3	Stima del carico	17
3.1	Descrizione del sistema HVAC	17
3.2	Stimatore del carico	21
3.2.1	Bypass e collettore	22
3.2.2	Serbatoio d'accumulo	25
3.2.3	Chiller e carico	26
4	Valutazione del fabbisogno di energia frigorifera	31
5	Modellizzazione e previsione del carico	37
5.1	Creazione del modello sui dati passati	37
5.2	Previsione degli ingressi	43
6	Prove simulative	49
6.1	Metodo PEM	49
6.2	Reti neurali artificiali feedforward	53
6.3	Reti neurali artificiali dinamiche	56
6.4	Tempi di calcolo	59
6.5	Varianti simulative	59
7	Conclusioni e sviluppi futuri	61
A	DesignBuilder e EnergyPlus	63

A.1 DesignBuilder	63
A.1.1 Simulazione e progetto	63
A.1.2 Dati	64
A.2 EnergyPlus	64
B Algoritmo di identificazione PEM	67
C Reti neurali artificiali	71
D Stimatore asintotico dello stato	75
Bibliografia	77

Elenco delle figure

2.1	Esempio di chiller prodotto da Rhoss S.p.a	6
2.2	Scambiatore di calore a doppio tubo	9
2.3	Torre di raffreddamento per refrigeratori d'acqua	10
2.4	Schema di principio di un sistema refrigerante a compressione a singolo stadio	14
2.5	Classificazione dei compressori	15
3.1	Sistema HVAC considerato	18
3.2	Schema di principio delle connessioni (tubature) tra chiller in parallelo e carico	22
3.3	Bypass idraulico. (a sinistra) Portata primario uguale alla por- tata secondario. (a destra) Portata al primario (lato sinistro) $\dot{m}_{tot} \leq \dot{m}_{ut}$ portata lato secondario (lato destro)	23
3.4	Esempio di collettore	24
3.5	Modello del serbatoio con le sezioni di miscelamento e stratifi- cazione	26
3.6	Schema a blocchi comprendente il bypass e il circuito secondario	27
3.7	Esempio di stima del carico con autovalori in 0 e 0.1	29
4.1	Edificio di simulazione con DesignBuilder	34
4.2	Risultato di una simulazione di un impianto HVAC con unità di trattamento aria CAV	36
5.1	Rappresentazione del metodo utilizzato per la previsione del carico frigorifero	38
5.2	Modello input/output considerato	39
5.3	Stima degli apporti solari tra il 16/05 e il 30/09	40
5.4	Stima degli apporti solari in una settimana di Luglio	41

5.5	Errore assoluto medio giornaliero in funzione della dimensione dell'identification set	43
5.6	Previsione della temperatura esterna a bulbo secco con modello ARMA	44
5.7	Previsione della temperatura esterna a bulbo secco con media oraria di tre giorni passati	45
5.8	Previsione della temperatura esterna a bulbo umido con modello ARMA	46
6.1	Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi CAV (algoritmo PEM)	50
6.2	Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi CAV (algoritmo PEM)	51
6.3	Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi VAV con Free Cooling (algoritmo PEM)	52
6.4	Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi VAV con Free Cooling (algoritmo PEM)	53
6.5	Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi CAV (reti feedforward)	54
6.6	Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi CAV (reti feedforward)	54
6.7	Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi VAV con Free Cooling (reti feedforward)	55
6.8	Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi VAV con Free Cooling (reti feedforward)	55
C.1	Schema di funzionamento di una rete neurale	72
C.2	Esempio di rete a tre livelli	72
C.3	Schema di funzionamento di una rete dinamica	74
D.1	Connessioni con il sistema da stimare: stimatore asintotico dello stato	76

Elenco delle tabelle

5.1	Ingressi del modello	39
5.2	Statistiche sull'errore di predizione della temperatura esterna a bulbo secco con modello ARMA	44
5.3	Statistiche sull'errore di predizione della temperatura esterna a bulbo secco con media oraria di tre giorni passati	45
5.4	Statistiche sull'errore di predizione della temperatura esterna a bulbo umido con modello ARMA	46
6.1	Carichi orari, medi, massimi e carico nominale	51
6.2	Riepilogo frequenze relative degli errori di predizione	57
6.3	Riepilogo statistiche sull'errore di predizione	58

Capitolo 1

Introduzione

L'acronimo HVAC indica tutti quei sistemi che si occupano di riscaldamento (Heating), ventilazione (Ventilating) e condizionamento dell'aria (Air Conditioning). Questi sistemi hanno pertanto lo scopo di regolare le condizioni dell'aria all'interno di determinate strutture, solitamente di grandi dimensioni, come industrie, ospedali, sedi di uffici ma sono anche fondamentali nel caso di particolari applicazioni che richiedono controlli accurati su temperatura, umidità o altri parametri. Con la dicitura HVAC si indicano quei sistemi usati sia per il condizionamento (nel senso del raffrescamento) degli ambienti, che per il riscaldamento, con particolare attenzione al trattamento dell'aria attraverso il controllo delle sue caratteristiche, come ad esempio l'umidità.

Un punto importante da prendere in considerazione per questi impianti è il consumo energetico. Impianti preposti al condizionamento dell'aria hanno sicuramente dei consumi considerevoli e questo rende estremamente importante cercare di utilizzare al meglio le unità operative. Per minimizzare il consumo energetico è necessaria una procedura di ottimizzazione, il cui obiettivo è quello di definire le modalità operative che portano al soddisfacimento delle condizioni richieste minimizzando il consumo energetico del sistema. I sistemi HVAC, infatti, hanno per prima cosa il compito di fornire delle condizioni salutarie e confortevoli agli occupanti; questo però deve essere fatto utilizzando efficientemente le risorse a disposizione, soprattutto le fonti di energia non rinnovabili, e limitando le emissioni inquinanti nell'aria e nell'acqua. Oltre agli accorgimenti che devono inevitabilmente essere presi in fase di progetto dell'impianto, è quindi necessario anche garantire un funzionamento dello stesso che permetta uno sfruttamento ottimo dei mezzi disponibili. Il fabbisogno energetico degli edifici rappresenta una quota considerevole del consumo totale

d'energia. Questo settore offre quindi notevole potenzialità di risparmio.

Il problema sviluppato nella tesi si snoda a partire dal lavoro compiuto da A. Nicolettis in [24] e M. Bertinato in [4]. Il loro lavoro si è concentrato sulla supervisione e ottimizzazione di impianti HVAC, utilizzando l'approccio degli algoritmi genetici per risolvere il problema della ripartizione ottima del carico tra i diversi refrigeratori che compongono un impianto HVAC. In questa ottica il problema affrontato nel presente lavoro è quello in particolare di sviluppare strategie di previsione del carico complessivo di un edificio. Per carico si intende la potenza necessaria per garantire determinate caratteristiche e condizioni ambientali all'interno degli edifici. Durante il periodo caldo dell'anno molte volte, al fine di ridurre la richiesta di raffreddamento di picco e, conseguentemente, i costi energetici del sistema, è utile prevedere una strategia di "immagazzinamento del freddo" utilizzando un accumulo frigorifero: questa tecnica consiste nella produzione durante il periodo notturno di tutta o di una parte dell'energia frigorifera richiesta durante il periodo diurno. Per quantificare l'energia da accumulare durante il periodo notturno è necessaria una previsione del carico frigorifero per le ore diurne successive.

Il problema di previsione del carico (load forecasting) è stato affrontato da diversi autori nella letteratura ingegneristica. Si tratta sostanzialmente di un problema di identificazione. Conoscendo tutti i fattori e le variabili che determinano il carico, identificando il modello ingressi/uscite è possibile ottenere la previsione. Per esempio in [34] vengono descritte diverse tecniche di identificazione applicate a edifici: tra le altre cose vengono sperimentati metodi di identificazione parametrica per trovare un modello in spazio di stato dell'edificio dal punto di vista termico. In [5] si fa una previsione del carico termico di un edificio servendosi di un modello "grey-box" definito attraverso la costruzione della rete termica dell'edificio. L'approccio "black-box" applicato in [10] è necessario se non si conosce nulla del sistema da identificare: Forrester and Wepfer hanno applicato il metodo MLR (multiple linear regression) usando un regressore di 24-h per predire il carico elettrico di un centro commerciale. In [20] MacArthur e altri autori hanno applicato un metodo di stima ricorsiva in linea per predire il comportamento del carico, stima basata su tecniche ARMA (Autoregressive moving average). Nakahara in [23] utilizza tra le altre cose il filtro di Kalman per l'ottimizzazione di un serbatoio d'accumulo d'energia. Un approccio metodologico differente per affrontare il problema predittivo è l'utilizzo delle reti neurali artificiali. Esse hanno rappresentato negli ultimi anni una soluzione valida per gestire problemi assai differenti tra di loro come:

- Funzioni di approssimazione, o di regressione, tra cui la previsione di serie temporali e l'identificazione di modelli;
- L'elaborazione dei dati, compreso il "filtraggio" (eliminazione del rumore), il clustering, separazione di segnali e compressione;

Ad esempio sono state applicate in [17] per ottenere una previsione del consumo elettrico di un centro commerciale. Kah e altri autori in [13] hanno applicato una rete modulare multilivello per controllare la temperatura dell'impianto di condizionamento di un bus. In [3] sono state utilizzate le reti neurali per l'ottimizzazione di un serbatoio d'accumulo d'energia per un edificio destinato ad attività lavorative. Un approccio interessante è descritto in [32] dove vengono combinati sia algoritmi neurali, sia metodi ARIMA, "grey-box" e MLR per correggere l'errore residuo sulla previsione ottenuta attraverso le reti neurali. La struttura della tesi viene di seguito esposta. Nel secondo capitolo della tesi verranno presentati i componenti principali che compongono un sistema HVAC, una sorta di glossario per capire agilmente i termini usati nel seguito. Il terzo capitolo descrive un metodo per trovare la stima del carico frigorifero, necessaria per ottenere i dati per l'identificazione. Successivamente nel quarto capitolo verranno descritti i principali fattori che determinano il carico frigorifero di un edificio; inoltre verrà presentato l'ambiente simulativo utilizzato. La fase successiva sarà quella di identificare un modello input/output ed elaborare la previsione del carico frigorifero (capitolo quinto). Prove simulate e risultati statistici vengono presentati in capitolo 6. La tesi si conclude con un capitolo dedicato alle considerazioni conclusive, dove vengono anche date delle tracce per possibili sviluppi futuri (capitolo 7).

Capitolo 2

Sistemi HVAC

I sistemi HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) sono degli insiemi di apparecchiature dedicate al condizionamento dell'aria all'interno di determinati edifici e assumono un ruolo importante nel caso di strutture di una certa dimensione. Le funzioni svolte dai sistemi HVAC si basano sui principi della termodinamica, sul trasferimento del calore e su una serie di scoperte e invenzioni che sono state fatte a partire dalla rivoluzione industriale e via via fino ad arrivare ai giorni nostri, dove c'è un continuo affinamento delle tecniche per raggiungere soluzioni sempre migliori. Riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria sono fattori strettamente correlati, che puntano al raggiungimento del comfort termico per gli occupanti, assicurando una qualità dell'aria accettabile e garantendo che i costi di installazione, operazione e manutenzione siano ragionevoli. Viste le dimensioni mediamente grandi di questi sistemi, risulta evidente come le apparecchiature che li compongono siano numerose. Dapprima si cerca dunque di dare una descrizione generica dei principali componenti presenti in un sistema HVAC.

2.1 Componenti di un sistema HVAC

Boiler Un boiler è un contenitore chiuso in cui l'acqua, o un altro fluido, viene riscaldata sotto pressione. Il fluido viene quindi fatto circolare fuori dal boiler in un sistema di condotti per essere utilizzato in vari processi o applicazioni legate al riscaldamento.

Chiller Un chiller è una macchina che rimuove calore da un liquido attraverso un ciclo di compressione del vapore, o attraverso un ciclo di assorbimento



Figura 2.1: Esempio di chiller prodotto da Rhoss S.p.a

del calore. Il liquido che viene raffreddato è di solito acqua, anche se possono essere presenti altre sostanze in percentuale variabile, come inibitori di corrosione o altri additivi. L'acqua fredda in uscita dal chiller viene poi utilizzata per raffreddare e deumidificare l'aria in strutture commerciali, industriali e istituzionali di medie-grandi dimensioni. Il chiller è una macchina molto costosa e molto dispendiosa dal punto di vista del consumo energetico, perciò è necessaria molta attenzione nelle fasi di scelta e manutenzione di queste apparecchiature. Esistono tipologie diverse di chiller: alcuni sono "assemblabili" in loco, in quanto i vari componenti (compressore, radiatore, scambiatore, pompe) sono acquistati dall'installatore separatamente e poi montati in un locale appositamente adibito; altri (ultimamente i più usati), detti "monoblocco", vengono venduti come un'unica macchina già assemblata che andrà semplicemente allacciata all'impianto. In base alla modalità di scambio di calore con l'ambiente esterno, i refrigeratori si distinguono in macchine a condensazione ad aria (attraverso dei sistemi di ventole il calore viene ceduto all'aria esterna) o ad acqua (condensazione remota) dove il calore viene estratto dall'acqua del circuito utenza per essere ceduto ad un secondo circuito a cui faranno capo delle torri di condensazione separate. Generalmente i monoblocco (i più diffusi) sono situati all'esterno degli edifici e presentano condensazione ad aria, mentre quelli da interno hanno la condensazione ad acqua con evaporatore separato. In figura 2.1 è rappresentato un chiller della ditta Rhoss S.p.a¹: si tratta di un refrigeratore a monoblocco con condensazione ad aria.

¹Azienda specializzata nella produzione di impianti HVAC; sede produttiva in via Oltre Ferrovia, 32 - 33033 Codroipo (Udine)

Condizionatori d'aria Un condizionatore d'aria è una macchina, un sistema o un meccanismo progettato per estrarre calore da una determinata area (o fornire calore ad una determinata area) usando un ciclo frigorifero. I condizionatori vengono usati soprattutto per riscaldamento e raffreddamento di edifici oppure, ad esempio, per il semplice raffreddamento all'interno dei veicoli. Un sistema che, oltre al condizionamento, garantisce anche il controllo di riscaldamento e ventilazione viene, come già detto, definito sistema HVAC.

Condotti d'aria Per distribuire e rimuovere l'aria vengono utilizzati dei condotti. I flussi d'aria possono comprendere l'aria fornita, l'aria di ritorno e l'aria esausta; la qualità dell'aria e la sua velocità sono fattori molto importanti in quanto vanno a determinare la sensazione termica percepita degli occupanti. A tal fine nei condotti o nelle parti terminali sono generalmente posizionati dei sistemi di filtraggio per rimuovere polveri, batteri e altri contenuti non desiderati dell'aria che viene immessa.

Diffusori I diffusori vengono utilizzati per distribuire l'aria condizionata e di ventilazione in modo uniforme, creando un movimento d'aria a bassa velocità nella parte di stanza occupata. I diffusori presentano diverse forme, a seconda delle applicazioni o anche semplicemente delle richieste del committente. A volte si possono anche trovare dei diffusori utilizzati per la funzione inversa, ossia convogliare l'aria esausta all'esterno della stanza, ma più spesso questo compito è assolto da apposite griglie.

Filtri per l'aria I filtri sono utili per rimuovere agenti contaminanti dall'aria, prevalentemente particelle solide come polvere, polline, muffa e batteri. I materiali utilizzati per il filtraggio possono essere di diversi tipi. Si va dalle fibre, come ad esempio il cotone, ad altri materiali che attraggono le particelle estranee per mezzo dell'elettricità statica. La scelta avviene a seconda della particolare applicazione in esame.

Griglie Le griglie (o grate) fanno parte dei terminali dell'impianto di un sistema di distribuzione dell'aria. Nella maggior parte dei casi queste griglie vengono utilizzate come unità di immissione dell'aria di ritorno o dell'aria esausta nei condotti per l'aria. In alcuni casi queste unità possono anche essere utilizzate come punti di uscita per l'aria che viene fornita alle varie zone. È

possibile trovare anche delle griglie fornite di valvola in grado di regolare il flusso d'aria.

Pannelli radianti I pannelli radianti sono sistemi di riscaldamento (ma recentemente utilizzati anche per il raffrescamento degli ambienti) che utilizzano il calore proveniente da tubazioni collocate dietro le superfici dell'ambiente da riscaldare. Il calore viene principalmente fornito attraverso l'irraggiamento e non attraverso la convezione, come invece avviene con i termosifoni usati nel riscaldamento tradizionale.

Vi possono essere:

- Pannelli radianti a pavimento: vengono utilizzati soprattutto nelle residenze; un circuito idraulico a temperature di 30/40°C scorre sotto il pavimento. Per la refrigerazione viene fatta circolare acqua a circa 10°C affiancando ai pannelli un sistema di deumidificazione per il controllo della condensa;
- Pannelli radianti a parete: vengono soprattutto utilizzati come integrazione di altri sistemi di riscaldamento come quelli a pavimento, per coprire le elevate dispersioni termiche in certi ambienti;
- Pannelli radianti a soffitto: sono utilizzati soprattutto nei casi in cui vi sia la necessità di riscaldare ambienti molto estesi, come i capannoni industriali (con il vantaggio di non dover intervenire sul pavimento). Generalmente l'impianto è costituito da un bruciatore esterno collegato a una condotta che si snoda all'interno dell'edificio riscaldandolo mediante irraggiamento; il rendimento è minore rispetto ai sistemi a pavimento;

Pompe Vengono utilizzate per mettere in circolo il fluido idronico nell'impianto. Possono essere montate in una macchina monoblocco o installate in locali appositi; affiancano sempre uno o più compressori. Esistono pompe a portata fissa e a portata variabile. Vi è inoltre la distinzione tra pompe volumetriche e fluidodinamiche. Le prime sfruttano una variazione di volume in una camera per provocare un'aspirazione o una spinta sul fluido. Nelle seconde invece il movimento del fluido è prodotto da un momento indotto dal fluido stesso. Esempi di pompe volumetriche sono le pompe a stantuffo, a diaframma, a ingranaggi, a camera variabile. Per quanto riguarda le pompe fluidodinamiche, possono essere citate le pompe centrifughe, le pompe lineari e le pompe magnetofluidodinamiche.



Figura 2.2: Scambiatore di calore a doppio tubo

Scambiatori di calore Si tratta di un'apparecchiatura costruita per scambiare calore in modo efficiente da un fluido ad un altro, senza alcun miscelamento tra i due fluidi coinvolti. Gli scambiatori di calore vengono utilizzati soprattutto in applicazioni legate al condizionamento dell'aria in edifici e veicoli. Questa classe di scambiatori prende il nome di batterie di raffreddamento (o riscaldamento) o di serpentine di raffreddamento (o riscaldamento), per la forma spesso utilizzata nelle tubature interne allo scambiatore. I fluidi impiegati più comunemente sono l'acqua, una soluzione di glicol e acqua, il vapore o un liquido refrigerante. Dal lato aria dello scambiatore di calore, vi è una sostanziale differenza tra i casi di riscaldamento e di raffreddamento. Nel secondo dei due casi, l'aria che viene raffreddata presenta un'umidità dovuta alla condensazione, ad eccezione dei casi di aria estremamente secca. Riscaldando l'aria invece si aumenta la sua capacità di mantenere l'acqua. Si capisce pertanto come le batterie di raffreddamento, devono essere progettate adeguatamente, in modo tale da gestire sia il carico latente (umidità), sia quello sensibile (raffreddamento richiesto). Un esempio di scambiatore di calore è riportato in figura 2.2.

Sistemi di controllo per applicazioni HVAC Si tratta di un sistema computerizzato (PLC, microcontrollore, pc industriale, scheda di calcolo dedicata) che ha lo scopo di controllare le condizioni climatiche all'interno degli edifici. Le apparecchiature di controllo possono essere di vario tipo: pneumatiche, elettroniche e dotate di microprocessore o meno, ma sicuramente il sistema complessivo deve prevedere l'impiego di un'unità di calcolo e di una rete di comunicazione. Nel caso di sistemi HVAC di dimensioni medio-grandi, un controllore centrale ha il compito di monitorare il funzionamento complessivo



Figura 2.3: Torre di raffreddamento per refrigeratori d'acqua

e di trasmettere alle singole unità i comandi appropriati attraverso opportuni algoritmi che vanno a definire i set-point e gli stati dei componenti costituenti l'impianto. Il sistema di supervisione dovrebbe controllare tutte le variabili d'impianto delegando ai controlli locali il minor numero di settaggi possibili. Possono inoltre essere predisposte opportune interfacce che permettano una interazione anche da parte degli operatori.

Torri di raffreddamento Sono una tipologia di “raffreddatori evaporativi”, utilizzate per raffreddare acqua o altri fluidi, portandoli ad una temperatura a bulbo umido vicina alla temperatura ambiente. In un sistema HVAC le torri di raffreddamento hanno lo scopo di raffreddare l'acqua del chiller, cioè di smaltire il calore sottratto agli ambienti da climatizzare. In figura 2.3 è rappresentato un esempio di torre di raffreddamento.

Tubature Vengono utilizzate per il trasporto di fluidi, cercando di effettuare tale spostamento nel modo più efficiente. I materiali impiegati possono essere vari: vetro, legno, alluminio, acciaio, plastica. All'interno di tubature vi sono vari componenti, come ad esempio valvole o altre apparecchiature, che tipicamente misurano e controllano la pressione, il flusso e la temperatura del fluido trasportato.

Umidificatori Gli umidificatori sono delle apparecchiature che incrementano la quantità di umidità presente nell'aria. Il tipo più comune di umidificatore,

quello “evaporativo”, consiste di

- serbatoio: comune a tutti gli umidificatori, è una riserva d’acqua che fornisce il vapore nell’ambiente;
- stoppino: si tratta di un filtro che assorbe acqua dal serbatoio;
- ventola: dirige l’aria sullo stoppino, favorendo l’evaporazione dell’acqua;

L’evaporazione dell’acqua dallo stoppino dipende dall’umidità relativa dell’aria. Una stanza con una bassa umidità avrà certamente un tasso di evaporazione più elevato rispetto ad una stanza con un’umidità maggiore. Si capisce, pertanto, come questo tipo di umidificatore abbia una specie di regolazione automatica: man mano che l’umidità della stanza aumenta, l’uscita di vapore acqueo decresce in modo naturale.

Deumidificatori Sono delle apparecchiature che hanno la funzione di ridurre il livello di umidità nell’aria. I condizionatori d’aria fungono automaticamente da deumidificatori quando raffreddano l’aria e hanno la necessità di gestire l’acqua di condensazione accumulata. Quest’ultima viene fatta evaporare all’esterno nelle unità più moderne, mentre in quelle più datate viene semplicemente fatta fuoriuscire all’esterno. Evidentemente gli impianti di condizionamento centralizzati richiedono un sistema di scarico per gestire l’acqua di condensazione.

Unità di trattamento aria Le unità di trattamento aria (Air Handling Units, abbreviato AHU) sono dei dispositivi che hanno il compito di distribuire l’aria condizionata ai vari ambienti. L’aria che viene trattata (condizionata) dalle unità di trattamento aria è la miscela di aria ricircolata dagli ambienti e aria primaria (o esterna). Questa soluzione permette sia il ricambio dell’aria negli ambienti (contributo dell’aria esterna) sia la riduzione dei consumi energetici con la ripresa dell’aria che era già stata precedentemente trattata. Di solito una AHU è una larga scatola di metallo che contiene al suo interno un ventilatore, elementi per il raffreddamento o il riscaldamento, filtri, limitatori di rumore e valvole. Solitamente il sistema è collegato ai condotti per la distribuzione dell’aria condizionata, che trasportano quest’ultima in tutto l’edificio, facendola poi tornare all’unità di trattamento aria.

I ventilatori possono operare a velocità fissa, offrire una determinata gamma di velocità predefinite oppure possedere un azionamento a frequenza variabile che gli permetta di coprire un campo esteso di velocità.

Valvole o regolatori di flusso di zona Un regolatore di flusso di zona è un particolare tipo di valvola utile per controllare il flusso d'aria in un sistema HVAC. Al fine di ottimizzare l'efficienza ed migliorare il comfort degli occupanti, solitamente gli edifici vengono suddivisi in più zone, in modo da poter regolare indipendentemente le varie zone a seconda del livello di occupazione e delle applicazioni. Questa suddivisione in diverse zone può essere ottenuta in uno dei due seguenti modi:

1. Unità di trattamento aria multiple: in questo caso si ha semplicità nel controllo, e se una AHU ha un guasto, le altre rimangono comunque funzionanti. Per contro presentano un costo elevato e si registra un consumo elevato;
2. Unità di trattamento aria singola e valvole di zona: vi sono vantaggi dal punto di vista del costo ma ci possono essere problemi di affidabilità, sia per quanto riguarda le valvole, sia per quanto riguarda le unità di trattamento aria; infatti, essendocene una sola, se questa si guasta tutto il sistema non è più operativo. Un ulteriore svantaggio, inoltre, è dato dal fatto che il controllo del sistema è inevitabilmente più complicato;

La scelta deve essere fatta valutando attentamente tutte queste variabili e considerando l'applicazione per cui il sistema viene progettato.

Ventole Sono i dispositivi che vengono utilizzati per la movimentazione dell'aria. Di solito sono costituite da superfici ampie e piatte che vengono fatte roteare al fine di garantire un certo benessere, una determinata ventilazione o assicurare il trasporto di qualche gas in applicazioni industriali.

Impianti di climatizzazione Solitamente la classificazione degli impianti di condizionamento viene fatta in relazione al fluido usato per rimuovere il calore dall'ambiente. Utilizzando tale criterio si possono distinguere:

- **Impianti a sola aria.** Negli impianti di questo tipo, l'aria viene immessa nelle singole stanze tramite un'apposita rete di distribuzione, che ha il compito di trasferire il caldo o il freddo che vengono prodotti in centrale;

- **Impianti a sola acqua.** Questi impianti impiegano come vettore, sia del caldo che del freddo, l'acqua, che viene opportunamente riscaldata o raffreddata in centrale e poi distribuita nei vari ambienti mediante pompe. Nei singoli ambienti sono poi presenti dei ventil-convettori (fan-coil) che permettono un'ulteriore regolazione della temperatura, in aggiunta a quella effettuata in centrale;
- **Impianti misti aria-acqua.** Negli impianti a sola acqua, durante il periodo invernale, si tende ad avere valori di umidità piuttosto bassi, mentre in estate i valori sono strettamente legati ai carichi interni. La regolazione con impianti a sola acqua è molto limitata, dunque, quando è richiesto un controllo dell'umidità più accurato, vengono utilizzati impianti misti aria-acqua. In centrale l'aria viene prelevata dall'esterno e trattata in relazione alle condizioni interne desiderate, in particolare viene garantito il grado igrometrico voluto. L'aria si occupa perciò di controllare l'umidità. Nei singoli ambienti invece vengono installati degli apparecchi alimentati con acqua calda o fredda aventi lo scopo di portare la temperatura al valore desiderato;

2.2 Il ciclo frigorifero

Il ciclo frigorifero è il processo che sta alla base delle applicazioni HVAC. Nelle applicazioni di condizionamento dell'aria che richiedono raffreddamento e deumidificazione è necessario ricorrere ad un mezzo refrigerante. Solo in pochi casi il mezzo refrigerante può essere l'acqua raffreddata semplicemente dall'aria esterna. Più spesso è necessario la "produzione del freddo", mediante un apposito ciclo frigorifero. In realtà il freddo non viene prodotto ma semplicemente il calore viene trasferito da un ambiente a bassa temperatura ad uno a temperatura superiore. Esistono due cicli termodinamici per ottenere questo risultato:

- ciclo ad assorbimento: si sfrutta il calore di dissoluzione di un soluto in un solvente (generalmente acqua) che viene ciclicamente concentrato e diluito. Il ciclo ad assorbimento non consente il raggiungimento di temperature particolarmente basse; è molto impiegato nei casi in cui si disponga di calore di esubero (cogenerazione) o in mancanza di energia elettrica;

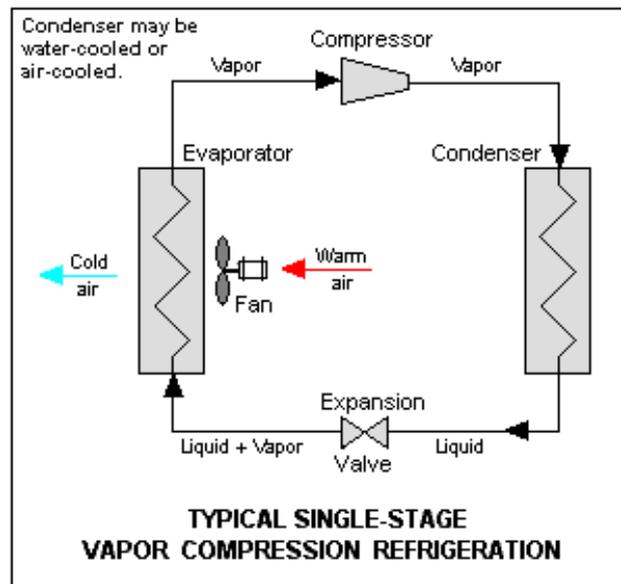


Figura 2.4: Schema di principio di un sistema refrigerante a compressione a singolo stadio

- ciclo a compressione: si applica un lavoro di compressione per far passare un fluido dallo stato gassoso al liquido; la compressione ed il cambiamento di stato producono calore, che è estratto dal ciclo; successivamente il liquido è fatto espandere ed evaporare, sottraendo calore nel cambiamento di stato inverso; il liquido in evaporazione (ed espansione) produce quindi il voluto effetto frigorifero. Il ciclo a compressione è il più diffuso nei condizionatori domestici e nei sistemi HVAC di medio-grandi dimensioni;

In figura 2.4 è rappresentato lo schema di un sistema che esplica il ciclo di compressione. Il fluido utilizzato in questi cicli è appositamente studiato per garantire elevata densità (sia del gas che del liquido), elevata entalpia di evaporazione ed elevata capacità termica; il tutto per minimizzare il lavoro richiesto al compressore. Oggi vengono utilizzati i cosiddetti HCFC (cloro-fluoro-carburi idrogenati), parecchio costosi. Questi fluidi artificiali presentano un notevole potenziale di effetto serra; è dunque in corso la ricerca di nuovi fluidi di ciclo che presentino buone proprietà termodinamiche e ridotto impatto ambientale. Tra i potenziali candidati vanno citati l'ammoniaca, l'anidride carbonica, il propano.

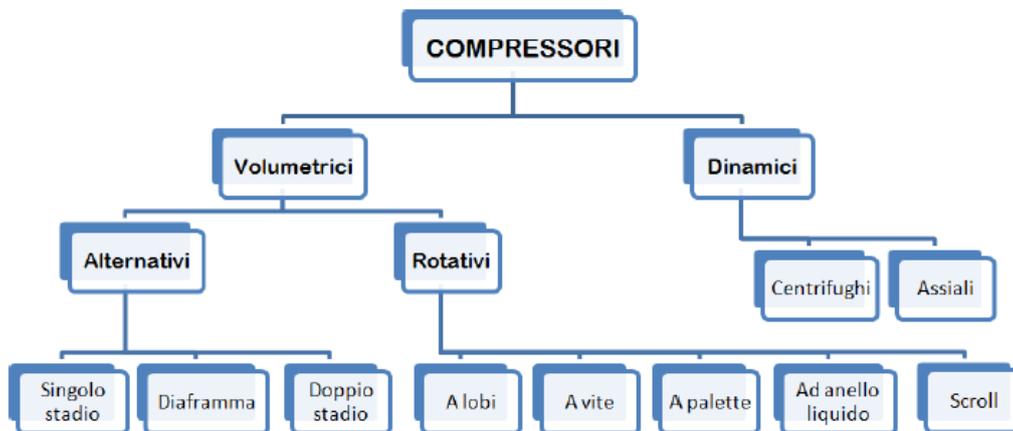


Figura 2.5: Classificazione dei compressori

2.3 Compressori

L'elemento fondamentale nei sistemi HVAC sotto un'ottica del raffrescamento di un ambiente è sicuramente il chiller; appare chiaro che il componente principale di queste macchine sia il compressore: il compito di questo dispositivo è essenzialmente l'innalzamento della pressione del fluido refrigerante attraverso una riduzione (meccanica) del suo volume.

In figura 2.5 vengono classificati vari tipi di compressori in base al principio meccanico di funzionamento. Nei compressori volumetrici il volume di gas che entra nella macchina è indipendente dalle condizioni di aspirazione e mandata; di solito presentano la caratteristica (che può essere un vantaggio o uno svantaggio) di avere portata direttamente proporzionale alla velocità di rotazione e rapporto di compressione indipendente da questo. Nei compressori dinamici invece la compressione è ottenuta sfruttando l'energia cinetica impressa al gas da opportuni meccanismi (si sfrutta il principio della variazione del momento della quantità di moto). Lo scambio di energia con il fluido avviene grazie alla rotazione di una ruota (detta rotore o girante) calettata su un albero, munita alla periferia di pale ed alloggiata in una cassa (detta statore) che può essere anch'essa munita di pale. Anche se lo scambio di energia tra fluido e macchina avviene in un organo rotante il processo si può considerare stazionario. Una descrizione accurata delle varie tipologie dei compressori è descritta in [4].

Capitolo 3

Stima del carico

Nel presente capitolo viene descritto un metodo per ottenere la stima del carico frigorifero (consumo di elettricità dei chiller). La stima è necessaria per ottenere i dati per l'identificazione e previsione del carico frigorifero (che saranno descritti in capitolo 5). Si suppone dunque di essere nel periodo caldo dell'anno e che l'impianto HVAC abbia funzione di condizionamento (raffrescamento) e di deumidificazione. Inizialmente quindi verrà descritto il sistema HVAC considerato; successivamente si passerà alla stima del carico.

3.1 Descrizione del sistema HVAC

In figura 3.1 è riportato il sistema HVAC considerato. L'impianto HVAC descritto è un impianto ad aria, in quanto sono presenti un'unità di trattamento d'aria centrale, dove l'aria viene raffreddata, e un sistema di distribuzione che serve le varie zone. Nell'impianto di figura è possibile individuare i tre sottosistemi che vengono di seguito descritti.

Impianto dei chiller I chiller rappresentano la fonte principale di raffreddamento all'interno di un sistema HVAC e possono essere presenti in numero maggiore a uno, adottando di solito una configurazione in parallelo. Ciascun chiller è di solito provvisto di una pompa, che viene attivata e disattivata assieme al chiller e non indipendentemente. La capacità di raffreddamento di ciascun chiller viene regolata da un apposito controllore, in modo tale da garantire il mantenimento del riferimento desiderato per l'acqua refrigerata in mandata. Il numero di chiller rappresenta una ulteriore variabile di controllo.

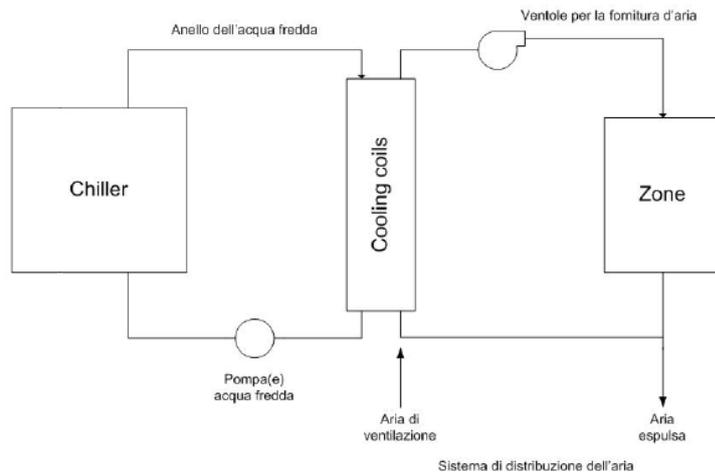


Figura 3.1: Sistema HVAC considerato

Al fine di ridurre la richiesta di raffreddamento di picco e, conseguentemente, i costi energetici del sistema, è possibile anche prevedere una strategia di “immagazzinamento del freddo”: la strategia dell’accumulo frigorifero consiste nella produzione durante il periodo notturno di tutta o di una parte dell’energia frigorifera (sotto forma di acqua o ghiaccio) richiesta durante il periodo diurno. Tale soluzione presenta i seguenti vantaggi:

- riduzione della potenzialità dei gruppi frigoriferi e dell’impegno di potenza elettrica;
- possibilità di sfruttare le tariffe multiorarie che prevedono costi inferiori durante il periodo notturno;
- disponibilità di una riserva costante di energia frigorifera, utile per superare interruzioni di energia elettrica di breve durata;
- possibilità di adottare impianti di distribuzione dell’aria a bassa temperatura, che consentono di ridurre le dimensioni di tubazioni idrauliche, pompe, canali d’aria e ventilatori;

L’utilizzo di un accumulo frigorifero necessita di un sistema computerizzato di gestione e la progettazione per questo tipo di sistemi è sicuramente più complessa. Inoltre gli oneri di manutenzione sono sicuramente maggiori. L’analisi economica di convenienza deve essere effettuata sulla base di una simulazione oraria dei carichi di raffreddamento e dei relativi costi energetici.

Possono essere adottate due strategie di accumulo:

- giornaliero ad accumulo totale, quando tutta l'energia frigorifera necessaria viene prodotta nel periodo a tariffa ridotta;
- giornaliero ad accumulo parziale, quando è previsto il funzionamento diurno dei gruppi frigoriferi ad integrazione;

La maggior parte degli impianti è realizzata secondo il secondo principio, in quanto consente un livellamento della richiesta smorzandone i picchi che coincidono con i periodi di punta delle tariffe, senza peraltro richiedere grossi volumi di accumulo.

Circuito dell'acqua refrigerata L'acqua, dopo essere stata raffreddata all'interno del chiller, viene mandata verso le batterie di raffreddamento mediante apposite pompe e tubature, che costituiscono il circuito dell'acqua refrigerata. La regolazione del flusso d'acqua viene fatta mediante valvole che vengono controllate adeguatamente.

Sistema di distribuzione dell'aria L'impianto di distribuzione dell'aria è costituito da un certo numero di unità terminali, da unità di trattamento dell'aria (Air Handling Units, AHUs), da condotti e da controlli dedicati. Le unità di trattamento aria a loro volta comprendono una spirale di raffreddamento, delle valvole, una ventola e degli appositi controlli. In ciascuna AHU, l'aria di ventilazione proveniente dall'esterno viene miscelata con l'aria di ritorno e, successivamente, fatta passare attraverso la spirale di raffreddamento per essere raffreddata e immessa nuovamente nelle zone dell'impianto che devono essere servite. Per quanto riguarda il controllo nelle varie zone servite, è possibile individuare due categorie principali di sistemi:

CAV Gli ambienti a portata costante (Constant Air Volume) immettono in ognuna delle singole zone in cui l'ambiente viene suddiviso una portata d'aria fissa con temperatura variabile in funzione del relativo carico. Tale variazione può essere ottenuta mediante il postriscaldamento locale (impianti monocondotto) oppure mediante la miscela tra due flussi d'aria, uno freddo e uno caldo. In questo caso gli impianti possono essere multizone oppure a doppio condotto, che differiscono tra loro per la posizione delle serrande di miscela. Gli impianti multizone realizzano la miscela dei due flussi d'aria a diversa temperatura direttamente nella sezione finale dell'unità di trattamento aria mediante coppie di serrande per ogni zona

servita. Essi vengono di solito impiegati per uffici di piccole dimensioni con un limitato numero di zone. Gli impianti a doppio condotto sono costituiti da due canali di distribuzione dell'aria separati a diversa temperatura (canale caldo e canale freddo) e da terminali di miscela dell'aria che si trovano in prossimità della zona da trattare. Questi impianti sono adatti per uffici modulari in cui non sia possibile stabilire a priori il numero esatto di zone, quando lo stesso dipende dalla distribuzione dei locali che viene decisa soltanto all'atto dell'insediamento. Gli impianti a portata costante consentono un accurato controllo della temperatura ed una risposta rapida alle variazioni di carico. Il controllo dell'umidità è meno preciso in quanto viene effettuato sul valore medio rilevato dalla sonda posta nel canale di ripresa comune. Essi presentano elevati costi di installazione per le canalizzazioni dell'aria e notevoli sprechi energetici nelle mezze stagioni, momento in cui si verifica una richiesta contemporanea di raffreddamento e riscaldamento, in quanto l'aria deve essere raffreddata dall'unità centrale in modo da neutralizzare il carico maggiore e successivamente riscaldata, attraverso una batteria o per miscelazione, così da soddisfare la richiesta del termostato.

VAV Gli impianti a tutta aria a portata variabile (VAV, Variable Air Volume) rappresentano attualmente il sistema di tipo centralizzato che meglio risponde alle esigenze dei moderni edifici. Gli impianti a portata variabile sono particolarmente adatti a neutralizzare i carichi di raffreddamento mediante la modulazione della portata d'aria immessa fino a un valore minimo (solitamente del 50 %). Soltanto nel caso in cui il carico di raffreddamento scenda sotto un certo valore, diventa necessario ricorrere al postriscaldamento locale. La portata totale di aria trattata risulta notevolmente inferiore a quella di un impianto a portata costante, in quanto essa viene calcolata in base al massimo carico contemporaneo. Il flusso viene variato mediante apposite valvole situate in unità terminali denominate "VAV boxes", che sono presenti in ciascuna delle zone da controllare. Dovendo anche garantire che la pressione statica nel condotto sia mantenuta al riferimento impostato, sarà necessario agire sul regolatore di flusso all'uscita della ventola, sull'inclinazione delle lame o sulla velocità del motore nel caso di motori a velocità variabile. Oltre alla temperatura dell'aria, è importante controllare anche l'umidità della stessa. In genere si sceglie di impostare dei valori fissi per i riferimenti di

temperatura, mentre, per quanto riguarda l'umidità, si permette che il valore rimanga flottante all'interno di un prefissato intervallo ammissibile. Un'ulteriore scelta che può essere implementata è quella di rilassare i vincoli nei periodi in cui l'edificio non è occupato (ad esempio di notte, da cui il nome di "night setup"), permettendo alla temperatura di salire oltre i limiti e riducendo in tal modo la richiesta di raffreddamento ed i relativi consumi. Nei sistemi VAV la portata di aria esterna può essere variata in funzione della temperatura esterna (free cooling o ciclo economizzatore): quando la temperatura dell'aria esterna scende sotto un certo valore previsto è possibile ridurre il carico sulle macchine frigorifere; sul totale di aria trattata viene aumentata la quantità di aria esterna su quella ricircolata. Gli impianti a portata variabile garantiscono un eccellente controllo della temperatura in ogni zona e presentano, rispetto agli impianti a portata costante minori consumi energetici e ventilatori e canali di dimensioni inferiori. L'aspetto negativo di questi impianti è costituito dal fatto che ad una riduzione di carico corrisponde una riduzione della portata d'aria immessa in ambiente, e ciò provoca in condizioni di carico minimo il cattivo funzionamento degli apparecchi di diffusione tradizionali con formazione di ristagni d'aria e correnti fredde. A tale inconveniente si può ovviare ricorrendo a vari tipi di diffusori concepiti per questo tipo di impianti, quali ad esempio quelli lineari a geometria variabile o a pavimento, oppure utilizzando terminali di regolazione della portata dotati di ventilatore di ricircolo in modo da mantenere costante la portata d'aria immessa in ambiente. Quest'ultimo sistema rappresenta la soluzione ottimale in termini di comfort, ma presenta più elevati costi di investimento e di gestione.

3.2 Stimatore del carico

Si vuole ora fare una stima del carico frigorifero a partire dalle grandezze misurabili nel "locale macchine" che ospita fisicamente i chiller in un impianto reale. Le ipotesi semplificative sono:

- le proprietà termofisiche dell'acqua sono costanti;
- l'acqua è incomprimibile;

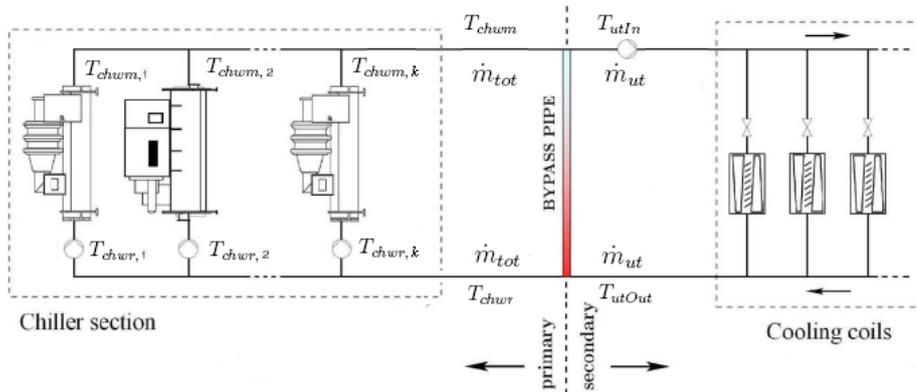


Figura 3.2: Schema di principio delle connessioni (tubature) tra chiller in parallelo e carico

- le tubazioni sono adiabatiche;

In figura 3.2 viene rappresentato un impianto i cui chiller sono posti in parallelo. Ciascun chiller è dotato di una pompa per la circolazione dell'acqua da refrigerare: essa viene attivata assieme al chiller. La temperatura dell'acqua di ritorno ai chiller $T_{chwr,i}$ è uguale per tutte le macchine, mentre le temperature di mandata ($T_{chwm,i}$) possono essere diverse (in base alla logica di controllo).

3.2.1 Bypass e collettore

Nell'impianto HVAC considerato viene usato un ramo di bypass: si tratta di una tubatura che collega il ramo di mandata in uscita dai chiller con il ramo di ritorno che proviene dall'utenza. Si definisce circuito primario la sezione idraulica che comprende le macchine di raffreddamento; il circuito secondario è la sezione idraulica che comprende i sistemi di distribuzione (pompe, collettori) e le utenze. In relazione al rapporto delle portate d'acqua dei circuiti primario e secondario è possibile valutare qualitativamente e quantitativamente gli effetti dell'inserimento del bypass. Il bypass (detto anche ramo disaccoppiatore) permette di gestire le eccedenze o i deficit di flusso proveniente dai chiller in parallelo: se al secondario viene richiesto – attraverso le pompe dei vari circuiti – un flusso maggiore rispetto a quello fornito dai rami attivi sul primario, parte dell'acqua di ritorno dall'utenza è forzata attraverso la tubatura di bypass a tornare sul ramo di mandata. Viceversa, nel caso di flusso eccedente dai chiller, l'acqua di mandata è forzata attraverso la tubatura di bypass ad andare sul ramo di ritorno senza passare per il circuito dell'utenza.

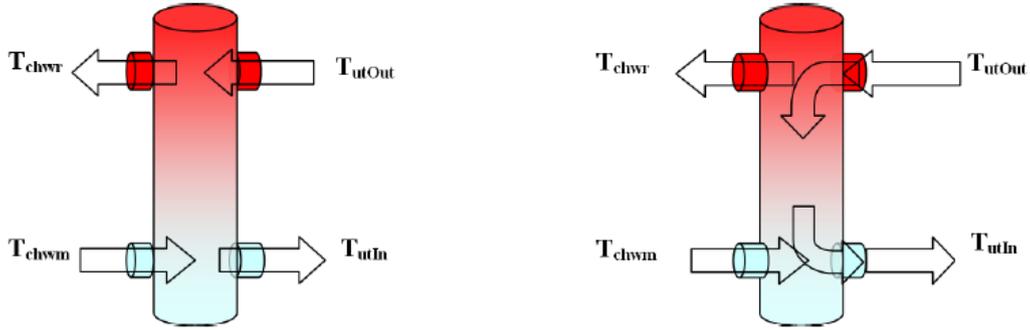


Figura 3.3: Bypass idraulico. (a sinistra) Portata primario uguale alla portata secondario. (a destra) Portata al primario (lato sinistro) $\dot{m}_{tot} \leq \dot{m}_{ut}$ portata lato secondario (lato destro)

Per semplicità si impone che la portata al secondario (lato utenza) sia costante e pari a \dot{m}_{ut} [Kg/s]. Si suppone che nel caso siano in stato ON tutte le pompe la portata complessiva al lato primario sia $\dot{m}_{tot} = \dot{m}_{ut}$. Quando invece un chiller è nello stato OFF anche la rispettiva pompa dedicata (figura 3.2) è spenta, quindi la portata sul circuito primario è uguale a:

$$\dot{m}_{tot} = \sum_{i=1}^k \dot{m}_i \quad (3.1)$$

e coincide con \dot{m}_{ut} nel caso tutte le pompe siano in stato ON (k indica il numero di pompe attivate, \dot{m}_i indica la portata del chiller i -esimo). In conclusione, grazie alle ipotesi semplificative individuate, vale $\dot{m}_{tot} \leq \dot{m}_{ut}$.

Nella condizione di figura 3.3 a sinistra, posto il regime stazionario, supponendo che non vi siano dispersioni termiche verso l'ambiente, si ha (si omette per semplicità di notazione la dipendenza delle temperature dal tempo):

$$Q_p = \dot{m}_{tot} c_p (T_{chwr} - T_{chwm}) = \dot{m}_{ut} c_p (T_{utOut} - T_{utIn}) = Q_s \quad (3.2)$$

dove con Q_p e Q_s si è indicata la potenza termica rispettivamente al lato primario e secondario. c_p indica il calore specifico dell'acqua (4.186 [J/(KgK)]). Per quanto riguarda le temperature si ha:

- T_{chwm} : temperatura acqua in uscita dal primario;
- T_{utIn} : temperatura acqua in entrata al secondario;
- T_{chwr} : temperatura acqua in entrata al primario;
- T_{utOut} : temperatura acqua in uscita al secondario;

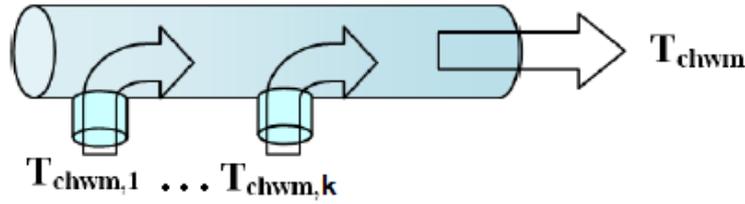


Figura 3.4: Esempio di collettore

Se le portate sono equivalenti si ha dunque:

$$T_{chwm} = T_{utIn} \quad (3.3)$$

$$T_{chwr} = T_{utOut} \quad (3.4)$$

Quando invece almeno uno dei due chiller è nello stato OFF, si entra nella condizione di figura 3.3 a destra: parte dell'acqua proveniente dall'utenza ritorna in mandata al carico. Rimanendo valide le rimanenti ipotesi fatte in precedenza, in questo caso si ha:

$$(T_{chwr} - T_{chwm})\dot{m}_{tot} = (T_{utOut} - T_{utIn})\dot{m}_{ut} \quad (3.5)$$

e, se sono rispettate le posizioni relative di mandata e ritorno tra primario e secondario, considerando che il flusso proveniente dal ritorno del secondario è maggiore di quello di ritorno al primario vale sempre

$$T_{chwr} = T_{utOut} \quad (3.6)$$

Combinando la (3.5) con la (3.6) si ottiene l'espressione (3.7) per la temperatura dell'acqua di mandata al circuito utenza (secondario) nota quella in uscita dai chiller e quella di ritorno dall'utenza.

$$T_{utIn} = T_{utOut} - \frac{\dot{m}_{tot}}{\dot{m}_{ut}}(T_{utOut} - T_{chwm}) = T_{utOut} - \frac{\dot{m}_{tot}}{\dot{m}_{ut}}(T_{chwr} - T_{chwm}) \quad (3.7)$$

Riferendosi allo schema di figura 3.2 si individuano nel circuito primario i nodi in cui l'acqua in uscita da ciascun chiller va a confluire sulla mandata del circuito stesso. Fisicamente il dispositivo che compie tale operazione è chiamato collettore (esempio in figura 3.4).

Posto il regime stazionario, si impone che la potenza termica entrante nel collettore sia uguale a quella uscente:

$$\sum_{i=1}^k \dot{m}_i c_\rho T_{chw,m,i} = \dot{m}_{tot} c_\rho T_{chw,m} \quad (3.8)$$

da cui:

$$T_{chw,m} = \frac{\sum_{i=1}^k \dot{m}_i T_{chw,m,i}}{\dot{m}_{tot}} \quad (3.9)$$

Ovviamente si suppone che valga la (3.1).

3.2.2 Serbatoio d'accumulo

Le funzioni del serbatoio sono molteplici. Innanzitutto la sua presenza è importante per motivi di sicurezza: il suo compito è quello di aumentare l'inerzia termica del sistema, al fine di abbassare la frequenza delle accensioni/spegnimenti dei compressori. In secondo luogo gli accumulatori sono utilizzati per questioni di tipo economico, poiché accumulando energia termica essi possono essere affiancati ai gruppi frigoriferi in fase di produzione di energia durante il picco di carico. Per la modellizzazione del serbatoio si è fatto riferimento a [1]; l'equazione differenziale che descrive la parte termodinamica del blocco accumulatore è la seguente:

$$T_{a,o}(t + \tau_a) + \frac{f_a \rho V_a}{\dot{m}_a} \frac{dT_{a,o}(t + \tau_a)}{dt} = T_{a,i}(t) \quad (3.10)$$

dove $T_{a,i}(t)$ e $T_{a,o}(t)$ sono le temperatura di ingresso e d'uscita dell'accumulatore, V_a il volume di fluido idronico ivi contenuto, ρ indica la densità del fluido. Nel ricavare la (3.10) il serbatoio è stato schematizzato in due sezioni separate connesse in serie: nella sezione d'ingresso si considera un completo miscelamento dell'acqua, in quella d'uscita si suppone una stratificazione (per effetto della diversa temperatura) del liquido (si veda figura 3.5). Il parametro f_a rappresenta la frazione del volume totale che definisce il punto di separazione delle due sezioni; τ_a è la costante di tempo che caratterizza il ritardo intrinseco del serbatoio. Ovviamente per la parte fluidodinamica del problema si impone che la portata in ingresso sia uguale a quella d'uscita e pari a \dot{m}_a . Per ottenere la (3.10), in [1] si parte dall'equazione di bilancio dell'energia della parte miscelata (vengono trascurati termini potenziali e cinetici):

$$\dot{m}_a c_\rho (-T_{a,i}(t) + T_{a,f}(t)) + f_a \rho V_a c_\rho \frac{dT_{a,f}(t)}{dt} = 0 \quad (3.11)$$

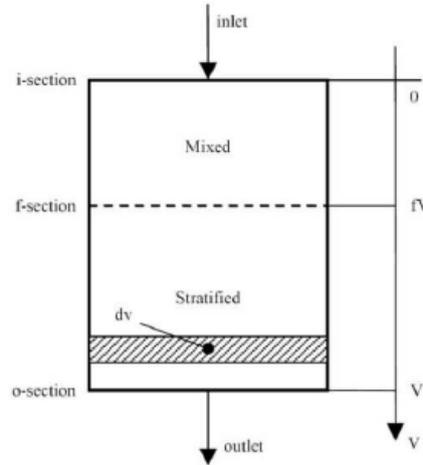


Figura 3.5: Modello del serbatoio con le sezioni di miscelamento e stratificazione

$T_{a,f}(t)$ indica la temperatura in uscita alla parte miscelata. Per la parte stratificata, considerando che in tale sezione non è contemplato il miscelamento, vale invece:

$$T_{a,o}(t) = T_{a,f}(t - \tau_a) \quad (3.12)$$

Combinando l'equazione (3.11) con la (3.12) si ottiene l'equazione (3.10). Trasformando con Laplace la (3.10) si ottiene la funzione di trasferimento dell'accumulatore:

$$W_a(s) = \frac{T_{a,o}(s)}{T_{a,i}(s)} = \frac{e^{-s\tau_a}}{1 + s \frac{f_a \rho V_a}{\dot{m}_a}} \quad (3.13)$$

3.2.3 Chiller e carico

Si consideri un blocco con un ingresso ed una uscita; sia che rappresenti un refrigeratore o un carico (a potenza istantanea assegnata), per il modello fluidodinamico vale ancora l'uguaglianza sulle portate di ingresso e d'uscita. Per la parte termo-dinamica, trascurando il contenuto dell'acqua all'interno del blocco k -esimo, risulta:

$$\dot{m}_k c_\rho (T_{k,i}(t) - T_{k,o}(t)) = \frac{dE_k}{dt} = Q_k \quad (3.14)$$

dove compare la variazione dell'energia termica E del blocco. Nota quindi (per il chiller dalle curve di resa fornite dal costruttore; per il carico da ta-

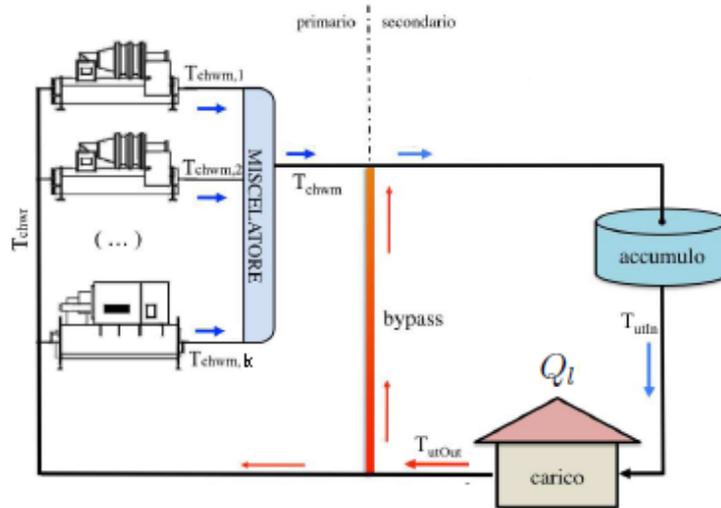


Figura 3.6: Schema a blocchi comprendente il bypass e il circuito secondario

belle orarie per un edificio campione) la potenza frigorifera sottratta (ceduta) dal chiller (carico/edificio) è possibile ricavare la temperatura d'uscita nota la temperatura d'ingresso al blocco.

Nel lato secondario del circuito idronico si suppone la presenza di un accumulatore a cui segue il blocco adibito a carica/uscita. Dallo schema di figura 3.6 si ricava, sotto le consuete ipotesi termodinamiche, l'equazione che descrive il bilancio energetico ($\dot{m}_p = \dot{m}_{tot}$ in questo caso):

$$\dot{m}_p c_p (T_{chwr}(t) - T_{chwm}(t)) + \rho c_p V_{acc} \frac{dT_{utIn}(t)}{dt} - Q_l(t) = 0 \quad (3.15)$$

dove si è supposto (come fatto in precedenza) che il bypass sia un dispositivo adiabatico e che la quantità di liquido idronico contenuto al suo interno sia trascurabile: quest'ultimo non va considerato nel bilancio energetico dello schema. V_{acc} indica il volume di fluido idronico contenuto nell'accumulatore. Si noti che la modellizzazione dell'accumulo è semplificata rispetto a quanto riportato in precedenza: si modella solamente la parte completamente miscelata del dispositivo, ignorando la sezione interessata dai fenomeni di stratificazione ($f_a = 1$); anche il contenuto d'acqua del circuito primario viene trascurata mentre si concentra nell'accumulatore quello del secondario. Si presume che l'algoritmo di supervisione e di controllo dell'impianto (con la parte dedicata alla stima del carico) abbia come hardware di supporto una scheda a microcontrollore o un pc industriale; si vuole dunque passare all'equazione a tempo discreto che approssima l'equazione del bilancio del carico; l'equazione (3.15)

viene discretizzata con Eulero¹ ottenendo:

$$Q_l(n)T_s = \dot{m}_\rho c_\rho (T_{chwr}(n) - T_{chwm}(n))T_s + \rho c_\rho V_{acc} (T_{utIn}(n+1) - T_{utIn}(n)) \quad (3.16)$$

dove n è un numero intero e T_s è il tempo di campionamento. Si suppone che il carico Q_l sia lentamente variabile e lo si suppone costante durante il periodo di campionamento: la (3.16) può essere rappresentata quindi con un sistema LTI di dimensione 2, i cui stati sono il carico termico e la temperatura dell'acqua che esce dall'accumulatore ed entra nel carico al secondario:

$$\begin{cases} Q_l(n+1) = Q_l(n) \\ T_{utIn}(n+1) = \frac{T_s}{\rho c_\rho V_{acc}} Q_l(n) + T_{utIn}(n) + \frac{\dot{m}_\rho T_s}{\rho V_{acc}} T_{chwm} - \frac{\dot{m}_\rho T_s}{\rho V_{acc}} T_{chwr} \end{cases} \quad (3.17)$$

Considerando come ingressi del sistema le temperature $[T_{chwm} \ T_{chwr}]^T$ e come uscita la T_{utIn} , si possono definire le matrici che descrivono $\Sigma(A, B, C, D)$ con

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{T_s}{\rho c_\rho V_{acc}} & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\dot{m}_\rho T_s}{\rho V_{acc}} & -\frac{\dot{m}_\rho T_s}{\rho V_{acc}} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

Lo stimatore asintotico dello stato di ordine intero² è un sistema LTI $\hat{\Sigma}(F, G, H, J)$ con ingresso $u_{\hat{\Sigma}} = [T_{chwm} \ T_{chwr} \ T_{utIn}]^T$ (dunque gli ingressi e l'uscita del sistema Σ); l'uscita è costituita dall'intero stato stimato $y_{\hat{\Sigma}} = [\hat{Q}_l \ \hat{T}_{utIn}]^T$. Le matrici dello stimatore risultano quindi:

$$F = [A - LC] \quad G = \begin{bmatrix} B & L \end{bmatrix} \quad H = I_{2 \times 2} \quad J = 0_{2 \times 3} \quad (3.19)$$

Per quanto concerne la matrice del guadagno di correzione L , vengono prese in considerazione diverse casistiche: la posizioni degli autovalori della matrice della dinamica dell'errore influenza ovviamente la velocità di stima a scapito però della reiezioni ai disturbi. Il calcolo di L , noti gli autovalori della matrice della dinamica dell'errore, è effettuato mediante il comando MATLAB place. Un esempio è riportato in figura 3.7 dove vi è il confronto tra carico vero

¹Metodo di risoluzione delle equazioni differenziali ordinarie di Eulero (in avanti): $\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x_{n+1} - x_n}{T_s}$

²Si veda Appendice D

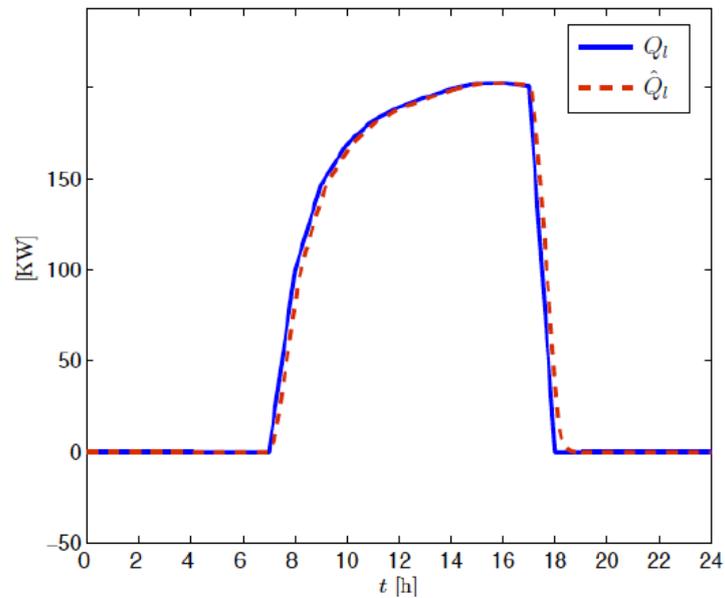


Figura 3.7: Esempio di stima del carico con autovalori in 0 e 0.1

Q_t e stimato \hat{Q}_t con autovalori della matrice F in 0 e 0.1. I risultati sono stati ottenuti in [4] riproducendo l'impianto HVAC in simulink (l'ambiente di programmazione grafico associato a MATLAB).

Tuttavia il metodo di stima proposto in questo capitolo (utile nella pratica) non sarà realmente utilizzato nella tesi in quanto fa riferimento alla possibilità di disporre concretamente di un impianto “vero” su cui eseguire i test o almeno di un laboratorio di prove. Non avendo a disposizione nulla di questo tipo per il momento si utilizzerà il software DesignBuilder³ per la generazione dei dati.

³Si veda Appendice A

Capitolo 4

Valutazione del fabbisogno di energia frigorifera

In questo capitolo si vogliono analizzare i principali fattori che determinano il carico frigorifero di un edificio¹. In generale, per carico frigorifero si intende la potenza erogata dai chiller per assicurare determinate condizioni ambientali. Si suppone di essere nel periodo caldo dell'anno e che l'impianto HVAC dell'edificio sia quello descritto in paragrafo 3.1.

Dati climatici

- **Temperatura aria esterna a bulbo secco:** è quella temperatura misurata da un comune termometro a bulbo. La misura di tale temperatura è assolutamente indipendente dall'umidità relativa dell'aria;
- **Temperatura aria esterna a bulbo umido:** è la temperatura a cui si porta l'acqua in condizioni di equilibrio di scambio convettivo e di massa d'aria in moto turbolento completamente sviluppato. Lo strumento utilizzato per tale misurazione è chiamato psicrometro. A partire dal valore della temperatura di bulbo umido si ricava l'umidità relativa di un ambiente. Alla saturazione (umidità relativa del 100 %), la temperatura del bulbo secco e del bulbo umido sono uguali; altrimenti la temperatura del bulbo umido è minore della temperatura del bulbo secco. La differenza tra le due temperature aumenta in corrispondenza ad una diminuzione dell'umidità relativa. L'umidità relativa è correlata al carico latente,

¹Si suppone che l'edificio considerato sia destinato ad attività lavorative giornaliere (es. uffici) in cui possono esserci anche conferenze e riunioni

cioè alla quantità d'acqua nell'aria esterna che l'Unità di trattamento aria deve condensare per portare l'aria in ingresso alle condizioni volute;

- **Apporti solari:** la radiazione solare colpisce soprattutto le zone perimetrali dell'edificio e in determinati orari. Essi sono carichi molto variabili e dipendono da:
 - orario del giorno: al mattino colpiscono le pareti che si espongono ad est, a mezzogiorno a sud e il pomeriggio ad ovest (riferendosi all'emisfero boreale);
 - latitudine, longitudine e giorno dell'anno: determinano l'incidenza e la direzione della radiazione solare;
 - grado di nuvolosità: la nuvolosità diminuisce la radiazione solare diretta dei raggi;
 - orientamento, forma dell'edificio, dimensioni e tipologia delle vetrate: sono caratteristiche proprie dell'edificio considerato;

Gli apporti solari possono essere drasticamente diminuiti in presenza di sistemi di schermatura, che permettono attraverso la loro azione una risposta dinamica adeguando le radiazioni solari incidenti sulle aperture trasparenti o vetrate di un edificio al fine di migliorare il comfort e ridurre il consumo energetico. Esempi di schermatura sono le veneziane o vetri oscurati;

Materiale di costruzione Anche il materiale e lo spessore delle pareti influenza il carico complessivo. In particolare la potenza scambiata per trasmissione con l'ambiente esterno, P_e è data da:

$$P_e = H_e \Delta T \quad (4.1)$$

- H_e è il coefficiente di dispersione termica per trasmissione tra la zona considerata e l'ambiente esterno;
- ΔT è la differenza di temperatura tra quella operante della zona considerata e quella dell'aria esterna;

Persone Il carico termico dipende molto dalla occupazione dell'edificio. Negli uffici mediamente si parla di una persona ogni 10 $[m^2]$. Le maggiori densità si hanno nelle sale d'attesa e nelle sale riunioni, dove si ha mediamente una persona ogni 2 $[m^2]$. Gli apporti termici pro capite sono circa 63 $[W]$ di calore sensibile e 69 $[W]$ di calore latente.

Illuminazione Anche l'illuminazione contribuisce a determinare il carico complessivo di un edificio. Nel caso di illuminazione da tavolo le lampade presentano un carico di 8-10 $[W/m^2]$. Le lampade a soffitto hanno mediamente un carico minore, ma sono più numerose. Complessivamente il carico dovuto all'illuminazione può essere considerato mediamente di 15-20 $[W/m^2]$ negli uffici.

Macchine varie e computer Negli ultimi anni si è verificato il fenomeno pressochè generalizzato della diffusione dei sistemi informatici negli uffici e negli ambienti di lavoro in genere. Le stazioni di lavoro collegate in rete e i Personal Computer dissipano in rete un'elevata quantità di calore che si aggiunge a quello di altre apparecchiature elettriche ed elettroniche (fotocopiatrici, stampanti, ecc.). Essi hanno un carico fortemente variabile a seconda del tipo di attività svolto nell'ufficio; è possibile ipotizzare un contributo medio di 20 $[W/m^2]$.

Tipologia unità di trattamento aria Fondamentale ai fini della determinazione del carico frigorifero dell'edificio è la tipologia di unità di trattamento aria. Sistemi CAV, VAV agiscono in modo diverso e quindi il carico risulta variabile a seconda del sistema considerato. Per fare un esempio, nel periodo caldo, nei sistemi VAV con Free cooling, se la temperatura esterna è minore di un certo valore, viene aumentata la quantità di aria esterna in ingresso riducendo il fabbisogno sulle macchine frigorifere. Anche la potenza di ventilazione impostata influisce sul carico in quanto l'aumento della ventilazione (corrispondente a un ricambio d'aria maggiore) comporta il raffreddamento di una maggiore quantità di aria.

Altri fattori Ai fattori già elencati se ne aggiungono altri, molto più aleatori, come per esempio il tempo e la percentuale di apertura di porte e finestre esterne soprattutto in caso di elevate temperature esterne.

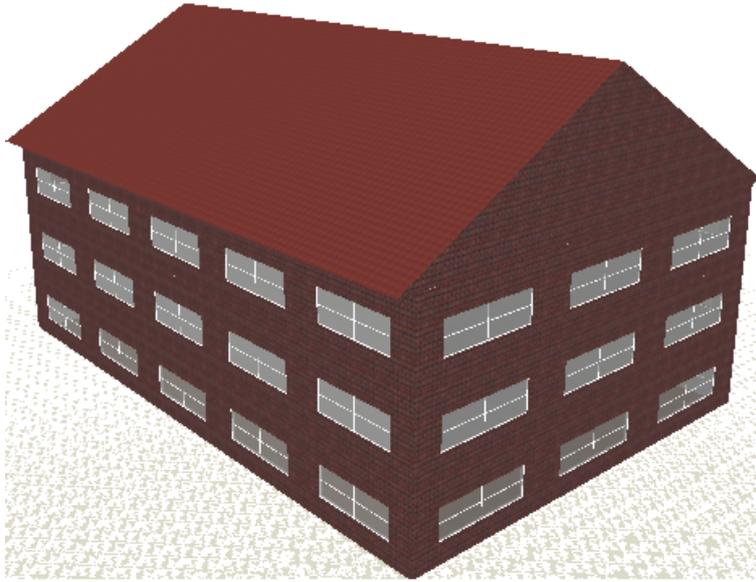


Figura 4.1: Edificio di simulazione con DesignBuilder

Simulazione

Non avendo al momento alcuna misura disponibile su edifici reali si è fatto ricorso, per questa prima fase di studio teorico, ad un simulatore, DesignBuilder, le cui caratteristiche verranno dettagliatamente descritte in Appendice A. Un esempio di edificio utilizzato per le simulazioni è riportato in figura 4.1. Le pareti, escluso il pavimento, scambiano calore con l'ambiente esterno. In questa ed anche nelle situazioni che seguiranno, l'edificio considerato è situato vicino a Venezia ed i dati climatici per la simulazione sono forniti dai database di EnergyPlus². In particolare i dati a disposizione sono quelli reali raccolti nella zona nel 2002.

DesignBuilder permette di impostare/modificare molti parametri. Si elencano di seguito i principali:

- programma di occupazione e densità di persone [*persone/m²*];
- apporti computer o altri strumenti [*W/m²*] e periodo in cui risultano accesi;
- tipologia di pareti (materiale di costruzione e quindi grado di isolamento termico);

²Si veda Appendice A

- dimensioni finestre e periodi in cui i sistemi di schermatura risultano attivati;
- tipo di illuminazione, apporti [W/m^2], e periodi in cui l'illuminazione è attiva;
- tipologia di Unità di trattamento aria (CAV, VAV...), potenza ($[vol/ora^3]$) e programma (periodi on/off);
- periodo di simulazione;

In seguito si vuole mostrare il risultato di una simulazione nelle prime tre settimane di Luglio. Per la seguente simulazione si è utilizzato un template tipico da ufficio. Quindi:

- l'occupazione di persone varia in funzione dell'ora del giorno. Raggiunge il picco di 0.25 [$persone/m^2$] dalle h.9:00 alle h.12:00 e dalle h.14:00 alle h.17:00 (diminuisce in ora di pranzo). Inoltre il mercoledì pomeriggio e il venerdì mattina è stata simulata una riunione quindi è presente una maggiore densità di persone;
- i computer rimangono accesi nelle ore di lavoro con un contributo medio di 20 [W/m^2];
- i sistemi di schermatura risultano attivati durante le ore lavorative;
- contributo di illuminazione di 15 [W/m^2] durante le ore di lavoro;
- programma di unità di trattamento aria come quello di occupazione (picco di 3 [vol/ora] negli stessi orari di massima occupazione);

È presente un sistema CAV per l'unità di trattamento aria. Questo vuol dire che la potenza di unità di trattamento aria è costante all'interno di ogni fascia oraria programmata.

Dopo la simulazione il programma restituisce graficamente i risultati come visualizzato in figura 4.2 (i dati sono orari). Nella prima immagine (partendo dall'alto) appaiono i vari consumi energetici. Quello che interessa per la previsione è il carico frigorifero (indicato con chiller). Nella seconda immagine in figura vi sono i dati di temperatura:

- temperatura dell'aria (interna);

³Volumi d'aria ricambiati all'ora (si intende il volume dell'edificio)

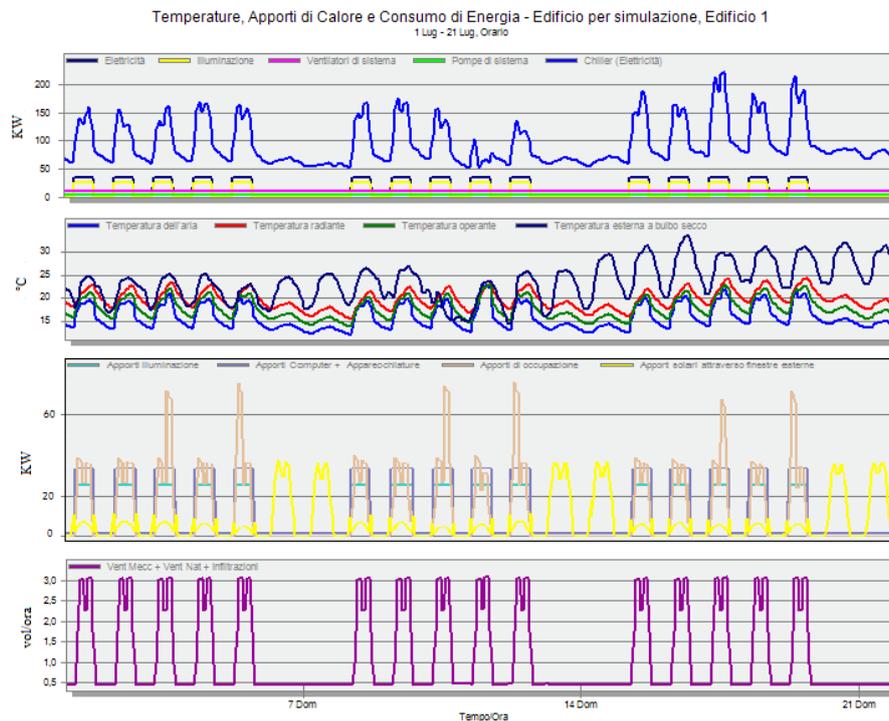


Figura 4.2: Risultato di una simulazione di un impianto HVAC con unità di trattamento aria CAV

- temperatura radiante: è la temperatura media delle superfici che racchiudono l'ambiente;
- temperatura operante: il risultato della media tra la temperatura dell'aria e la temperatura radiante;
- temperatura esterna a bulbo secco;

Nella terza immagine vi sono i vari apporti (potenze) dovuti all'occupazione, illuminazione, presenza di computer oltre agli apporti solari. Da notare come nei week-end vi siano solo apporti solari: questi risultano maggiori degli altri giorni perchè i sistemi di schermatura vengono attivati durante i giorni feriali. Si nota come il mercoledì pomeriggio e il venerdì mattina vi siano maggiori apporti di occupazione dovuti alla simulazione di una riunione. Infine la potenza UTA (Unità di trattamento aria) è programmata in modo da seguire l'andamento dell'occupazione e risulta all'incirca costante all'interno di ogni fascia temporale programmata (quarta immagine).

Capitolo 5

Modellizzazione e previsione del carico

In questo capitolo viene descritto l'approccio utilizzato per elaborare la previsione¹ del carico. In sintesi si utilizza il seguente metodo:

- identificazione di un modello sui dati passati (input - output);
- previsione degli ingressi per le ventiquattro ore successive;
- eccitazione del modello con gli ingressi predetti ottenendo la previsione del carico per le ventiquattro ore successive;

In figura 5.1 viene rappresentato graficamente il metodo utilizzato (d indica il giorno in cui viene elaborata la previsione, k il numero di giorni utilizzati per l'identificazione).

Il programma DesignBuilder offre la possibilità di esportare i dati visualizzati (come in figura 4.2) in un foglio elettronico². Il foglio elettronico viene importato in MATLAB dove sono stati sviluppati i metodi di previsione.

5.1 Creazione del modello sui dati passati

Per l'identificazione del modello si utilizza un approccio "black-box"; si conoscono gli ingressi e le uscite ma non è data alcuna informazione sul modello da identificare; il modello è di tipo MISO³ (multi input, single output) ed in particolare gli ingressi considerati sono:

¹Si suppone che la previsione venga fatta alle h.24:00 per le ventiquattro ore successive

²Tutti i dati presenti nel foglio elettronico sono orari

³I dati di ingresso e uscita sono forniti da DesignBuilder e sono orari

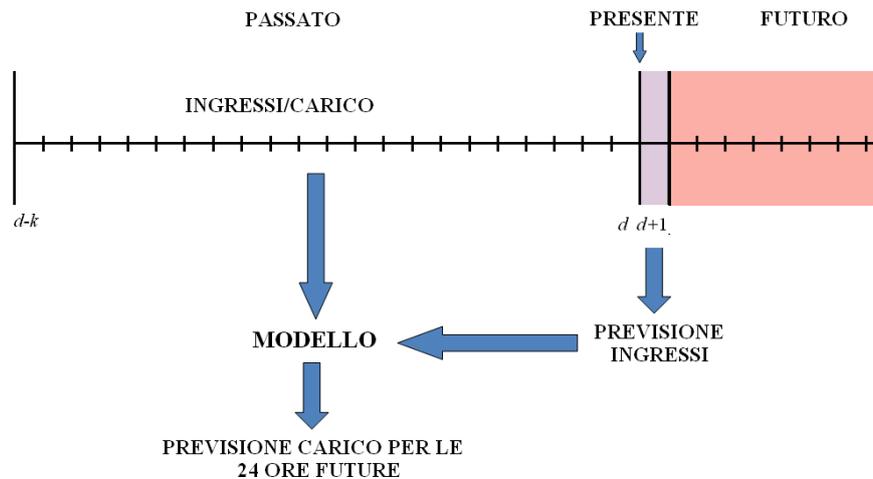


Figura 5.1: Rappresentazione del metodo utilizzato per la previsione del carico frigorifero

- apporti di occupazione;
- apporti di illuminazione;
- apporti computer e/o altre macchine;
- apporti solari;
- temperatura esterna a bulbo secco;
- temperatura esterna a bulbo umido;
- potenza e programma di ventilazione;

Le caratteristiche degli ingressi considerati sono state descritte in maniera esauriente nel capitolo precedente. Non viene preso in considerazione il materiale di costruzione in quanto è una caratteristica non tempo-variante del modello da identificare. La potenza e il programma di ventilazione rientrano nella tipologia di unità di trattamento aria. L'output del sistema sarebbe la stima del carico frigorifero ottenuto; in realtà per l'identificazione si utilizza il carico vero (cioè prodotto dalle simulazioni con DesignBuilder) in quanto si suppone che l'errore di stima sia trascurabile⁴ (Cfr. figura 3.7). In figura 5.2 è rappresentato il modello input/output considerato.

Un problema da considerare è il seguente: alcuni dati in ingresso non possono essere conosciuti in un contesto reale. Si considerino ad esempio gli apporti

⁴Come già accennato non si ha a disposizione un impianto "vero" su cui eseguire i test

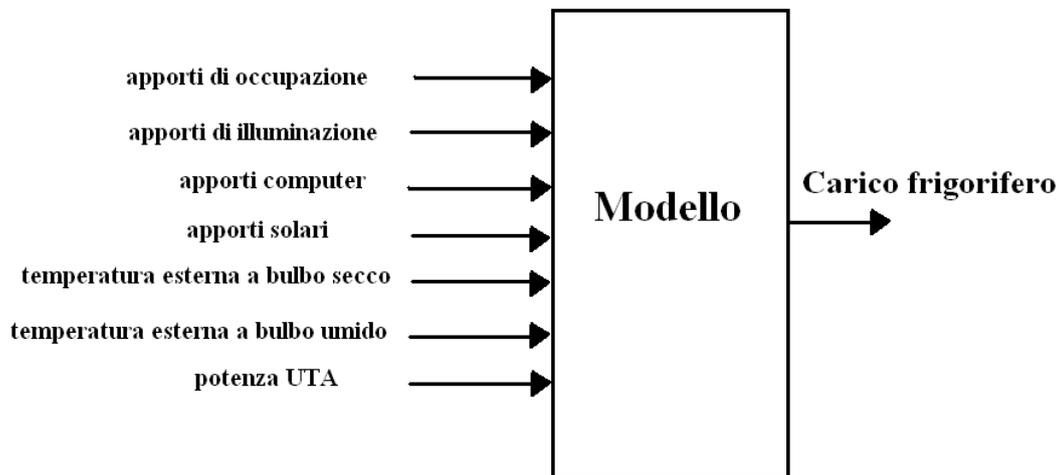


Figura 5.2: Modello input/output considerato

INGRESSI DEL MODELLO	
conosciuti	non conosciuti
Temperatura esterna a bulbo secco	apporti occupazione
Temperatura esterna a bulbo umido	apporti computer
Potenza e programma di ventilazione	apporti illuminazione
	apporti solari

Tabella 5.1: Ingressi del modello

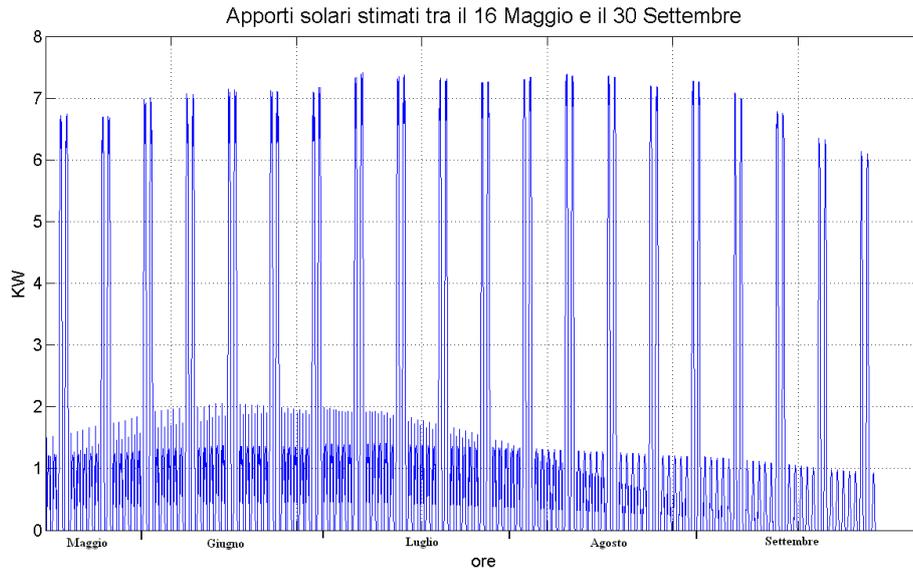


Figura 5.3: Stima degli apporti solari tra il 16/05 e il 30/09

di occupazione. Nel programma DesignBuilder possono essere impostati la densità di persone e il programma di occupazione dell'edificio. Il simulatore quantifica queste informazioni in un apporto numerico ($[KW]$, in funzione dell'ora del giorno) che svolge il ruolo di ingresso al modello. Tuttavia in un contesto reale risulta assai difficile quantificare questi apporti. Analogo ragionamento può essere fatto con gli apporti di illuminazione, apporti computer e apporti solari (tabella 5.1). Per quanto riguarda gli apporti solari, se l'ambiente simulativo rispecchia esattamente la forma dell'edificio considerato e anche il suo orientamento (oltre alla località in cui si trova) è possibile sfruttare gli apporti solari forniti dal simulatore in tutto il periodo caldo considerato (in questo caso nell'estate del 2002). La stima degli apporti solari in un determinato giorno ad una certa ora viene ottenuta facendo una media oraria (stessa ora in diversi giorni) dei dati forniti da DesignBuilder su un periodo che va dai venti giorni precedenti ai venti giorni successivi. La stima viene dunque utilizzata come ingresso al modello.

In figura 5.3 vi è il risultato della stima degli apporti durante il periodo caldo (dal 16/05 al 30/09) di un edificio utilizzato per le simulazioni e in figura 5.4 è rappresentata la stima di una settimana nel mese di Luglio (ingrandimento della figura 5.3). Nei week-end (sabato e domenica) si notano maggiori apporti in quanto non sono attivati i sistemi di schermatura. Non vengono rappresentati i dati veri di apporti solari in quanto si hanno errori relativi molto bassi (qualche valore percentuale) e i grafici di stima e dati veri sarebbero quasi

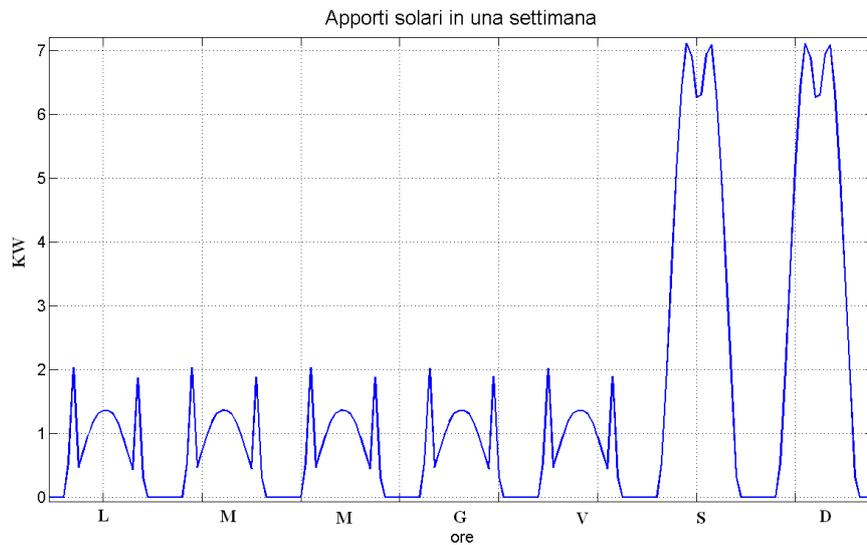


Figura 5.4: Stima degli apporti solari in una settimana di Luglio

sovrapposti. Risulta possibile dunque utilizzare la stima degli apporti solari come ingresso al modello.

Per quanto riguarda gli altri apporti non conosciuti (che verranno considerati come disturbi) si è proceduto nel seguente modo. In fase simulativa sono stati annullati e quindi si è ottenuto il carico dovuto solamente agli ingressi conosciuti. La stima dei disturbi è stata compiuta facendo la differenza tra carico vero (ottenuto simulando l'edificio con i disturbi) e carico calcolato nel caso precedente. Tuttavia il precedente approccio può essere utilizzato in fase simulativa e non in fase sperimentale. Infatti in un contesto reale è impossibile riuscire a ottenere i dati di carico frigorifero di un edificio senza i disturbi. Sarebbe necessario attivare gli impianti di condizionamento senza alcun carico antropico (carichi dipendenti dalla presenza dell'uomo quali i disturbi). Allora in fase di creazione del modello⁵ non vengono considerati i disturbi ma vengono considerati come ingressi solo i dati conosciuti e la stima degli apporti solari:

- Temperatura esterna a bulbo secco;
- Temperatura esterna a bulbo umido;
- Stima degli apporti solari;
- Potenza e programma di ventilazione;

⁵Si riferisce al modello complessivo in cui si considera il carico ottenuto con i disturbi

I disturbi oltre ad essere molto correlati tra di loro in quanto risultano tutti presenti nei giorni feriali, sono molto correlati anche alla potenza di ventilazione, il quale risulta essere un ingresso conosciuto. Una variazione dell'uscita dovuta alla variazione dei disturbi viene interpretata dall'algoritmo di identificazione come dovuta alla variazione della potenza di unità di trattamento aria, in caso quest'ultima sia correlata ai disturbi, come si suppone in questo caso. Dunque pur non ottenendo un modello esatto in quanto non tiene conto della presenza dei disturbi, il modello ottenuto risulta adatto per comprendere le relazioni ingresso-uscita. L'identificazione del modello avviene utilizzando algoritmi PEM⁶ e reti neurali artificiali⁷.

Quantità di dati per l'identificazione Un problema da tenere presente è la quantità di dati su cui identificare. In figura 5.5 vi sono i risultati dell'errore medio giornaliero nel caso di impianti a unità di trattamento aria costante con modello creato con le reti neurali. In ascissa vi è la dimensione dell'identification set (insieme dei dati di identificazione). L'errore misura la differenza tra carico reale e carico in uscita dal modello identificato eccitato con i medesimi ingressi con cui è stato ottenuto il carico reale nella simulazione. Se l'identification set è maggiore di 20 giorni (corrispondenti a 480 dati-ore) l'errore si stabilizza nella fascia compresa tra i ± 8 [KW]. Questi risultati sono relativi a un caso particolare; si nota comunque come all'aumentare del numero dei dati, migliori la qualità dell'identificazione ottenuta.

Procedura di validazione Il modello trovato tramite algoritmi PEM o reti neurali è stato sottoposto a procedura di validazione. La procedura di validazione viene fatta con dati di input/output diversi da quelli con cui è stato identificato il modello. Nel caso di identificazione con algoritmo PEM il modello è stato validato con dati raccolti con le seguenti varianti di simulazione:

- sono state variate le dimensioni delle finestre per modificare i dati relativi agli apporti solari;
- è stata variata la potenza di ventilazione;

In caso di identificazione con le reti neurali la procedura di validazione viene fatta già dall'algoritmo il quale divide l'insieme dei dati a disposizione:

⁶Una descrizione dettagliata per quel che riguarda l'identificazione e l'algoritmo PEM si trova in Appendice B

⁷Le reti neurali artificiali vengono approfondite in Appendice C

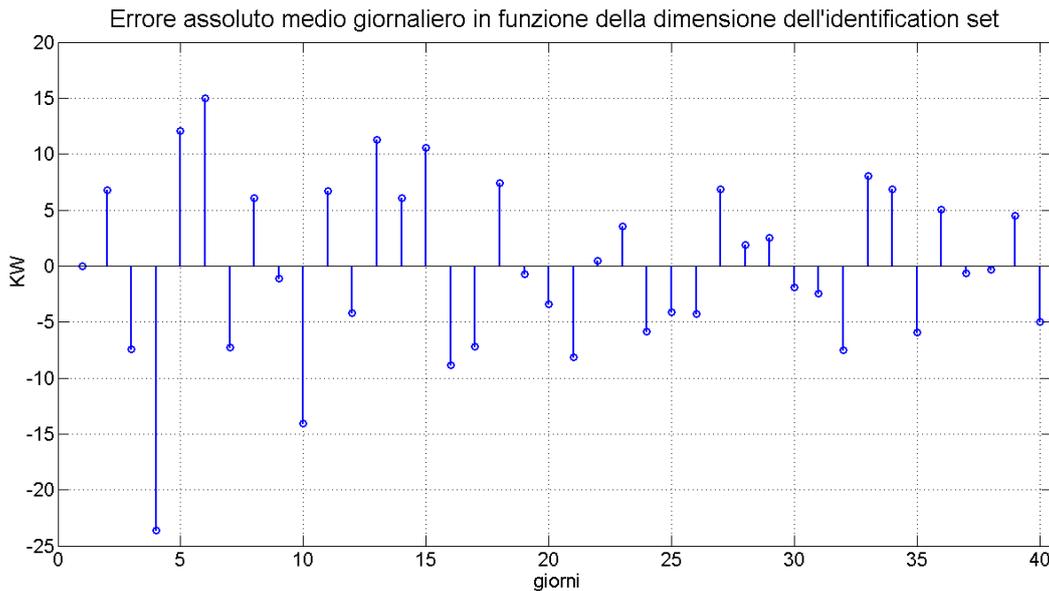


Figura 5.5: Errore assoluto medio giornaliero in funzione della dimensione dell'identification set

- 60 %: identificazione del modello;
- 40 %: validazione del modello;

Le percentuali possono essere variate attraverso le diverse opzioni presenti sugli algoritmi.

5.2 Previsione degli ingressi

Risulta necessario ora ottenere una previsione degli ingressi conosciuti per le ventiquattro ore successive.

Temperatura esterna a bulbo secco. La previsione viene fatta modellizzando i dati di temperatura passati come un sistema ARMA auto-regressivo del tipo:

$$T_s(\tau) + \dots + \alpha_{n_a} T_s(\tau - n_a T) = \gamma_0 \epsilon(\tau) + \dots + \gamma_{n_c} \epsilon(\tau - n_c T), \quad \tau \in \mathbb{Z} \quad (5.1)$$

$T_s(\tau)$ indica la temperatura esterna a bulbo secco; con $\epsilon(\tau)$ si indica l'errore residuo. I dati di temperatura sono disponibili ogni ora⁸ ($T = 1$ [ora]). Sul modello base (5.1) viene applicato l'algoritmo PEM utilizzando i dati veri di

⁸I dati di output di DesignBuilder sono orari

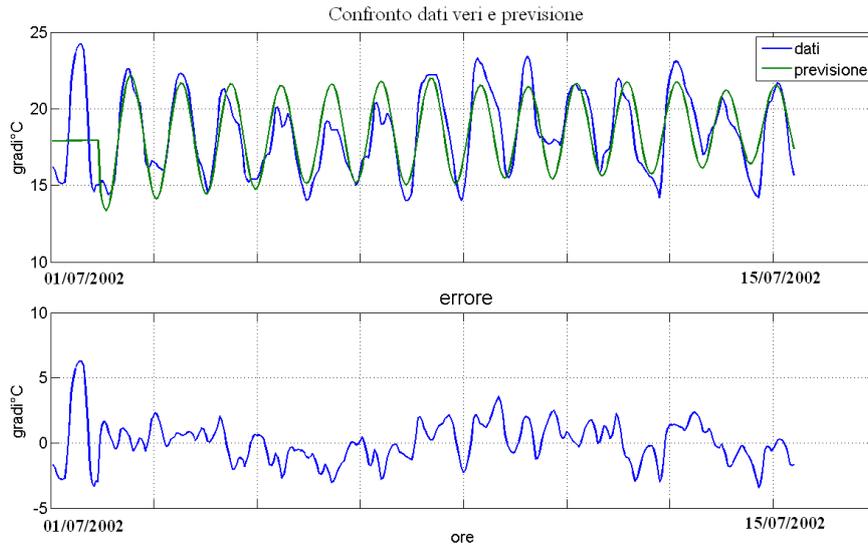


Figura 5.6: Previsione della temperatura esterna a bulbo secco con modello ARMA

	Valore [$^{\circ}C$]
Errore minimo	0.0049
Errore massimo	6.2728
Media errore	0.0221
Deviazione standard	1.6188

Tabella 5.2: Statistiche sull'errore di predizione della temperatura esterna a bulbo secco con modello ARMA

temperatura dei giorni precedenti per ottenere la previsione per le ventiquattro ore successive. La quantità dei dati passati su cui identificare non è un problema banale. Si è osservato che risultati efficienti vengono raggiunti quando si utilizzano almeno dieci giorni. Pochi dati infatti sono spesso influenzati da variazioni di carattere temporaneo della temperatura esterna e quindi non è possibile in tal caso identificare in modo adeguato il modello. Gli ordini del modello ARMA n_a e n_c vengono scelti dall'algoritmo PEM cercando di ottenere un modello che minimizzi l'errore residuo. In figura 5.6 vengono rappresentati graficamente i risultati della previsione a 24 ore sui dati raccolti tra il 01/07/2002 e il 15/07/2002 a Venezia. Le statistiche sull'errore si trovano in tabella 5.2.

Altra possibilità per compiere la previsione è quella di utilizzare una media dei dati passati: la previsione ad ogni ora viene calcolata facendo la media dei dati nella stessa ora dei giorni precedenti. In figura 5.7 vi è la previsione ottenuta con media oraria di tre giorni passati. Le statistiche sono abbastanza simili

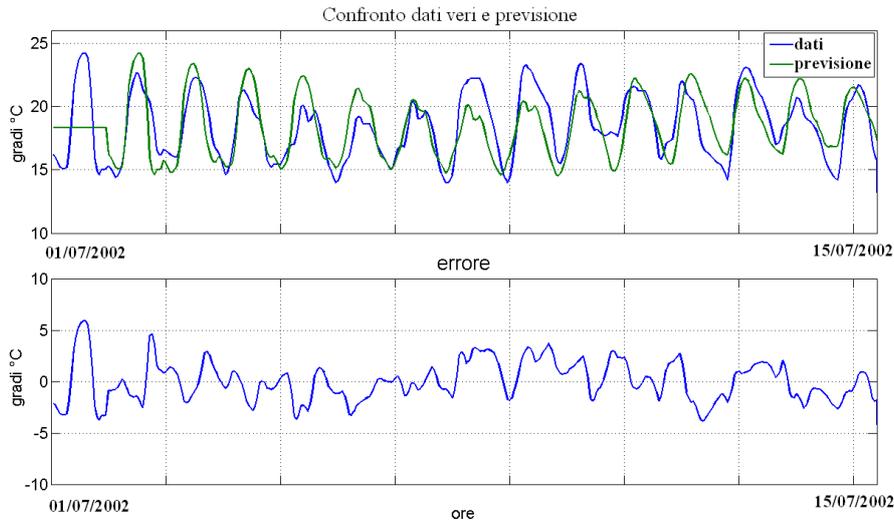


Figura 5.7: Previsione della temperatura esterna a bulbo secco con media oraria di tre giorni passati

	Valore [$^{\circ}C$]
Errore minimo	0
Errore massimo	5.8667
Media errore	0.0204
Deviazione standard	1.9295

Tabella 5.3: Statistiche sull'errore di predizione della temperatura esterna a bulbo secco con media oraria di tre giorni passati

al caso precedente: una maggiore deviazione d'errore è presente nel secondo caso (tabella 5.3). Tuttavia i risultati statistici differiscono volta per volta a seconda dei giorni considerati e non può essere definito a priori quale dei due metodi risulti migliore.

Temperatura esterna a bulbo umido La previsione della temperatura esterna a bulbo umido viene fatta in modo analogo a quella della temperatura a bulbo secco. I risultati risultano notevolmente peggiori del caso precedente in quanto l'umidità ha un andamento molto aleatorio, difficilmente interpretabile da un modello ARMA (figura 5.8). Le statistiche sull'errore sono riportate in tabella 5.4.

I risultati ottenuti facendo una media oraria dei giorni precedenti sono all'incirca analoghi e con un errore marcato di predizione, come si può immaginare osservando l'andamento altamente aleatorio della temperatura a bulbo umido in figura 5.8.

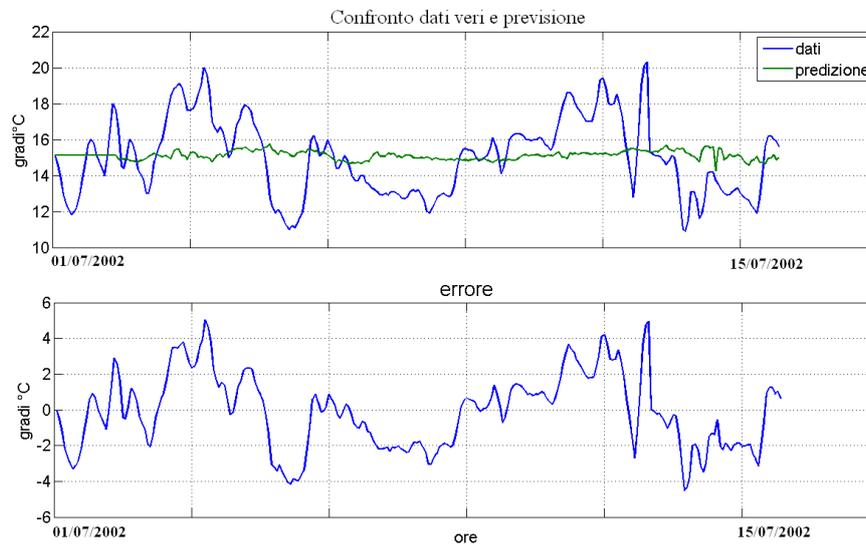


Figura 5.8: Previsione della temperatura esterna a bulbo umido con modello ARMA

	Valore [$^{\circ}C$]
Errore minimo	0.0041
Errore massimo	5.0182
Media errore	-0.1272
Deviazione standard	2.1026

Tabella 5.4: Statistiche sull'errore di previsione della temperatura esterna a bulbo umido con modello ARMA

Apporti solari In questo caso come previsione giornaliera si utilizzano i dati ottenuti filtrando⁹ gli apporti solari prodotti dalla simulazione dell'edificio considerato nel periodo caldo del 2002 (come spiegato in paragrafo 5.1).

Programma e potenza di ventilazione Il programma orario e la potenza di ventilazione vengono direttamente impostati dall'utente (utilizzatore). Si suppone in questo caso che vengano attivati durante i giorni feriali con picchi verso mattina e pomeriggio in cui risulta massima la richiesta di ricambio d'aria per la densità di persone.

Per ottenere la previsione del carico infine si è solamente provveduto ad eccitare il modello identificato relativo al passato con gli ingressi predetti. I risultati della previsione vengono descritti in capitolo 6 dove vi sono diverse prove simulative.

⁹La media oraria viene ottenuta con filtro uniforme

Capitolo 6

Prove simulative

In questo capitolo vengono rappresentati i risultati delle simulazioni effettuate utilizzando i metodi e le tecniche descritte in capitolo 5. I risultati della previsione nei giorni considerati vengono ottenuti iterativamente: la previsione per le ventiquattro ore successive avviene giornalmente. Dunque ad ogni iterazione¹ avviene:

- identificazione del modello sui dati passati;
- previsione degli ingressi;
- previsione del carico tramite eccitazione del modello con gli ingressi predetti;

Per quanto riguarda il numero di dati su cui identificare si utilizzano tutti i dati disponibili nel passato (si suppone di disporre dei dati dall'inizio della stagione calda). L'identificazione del modello è stata fatta con:

- algoritmi PEM;
- reti neurali artificiali feedforward;
- reti neurali artificiali dinamiche;

Di seguito verranno descritti i risultati della previsione nei diversi casi.

6.1 Metodo PEM

¹cioè ad ogni giorno

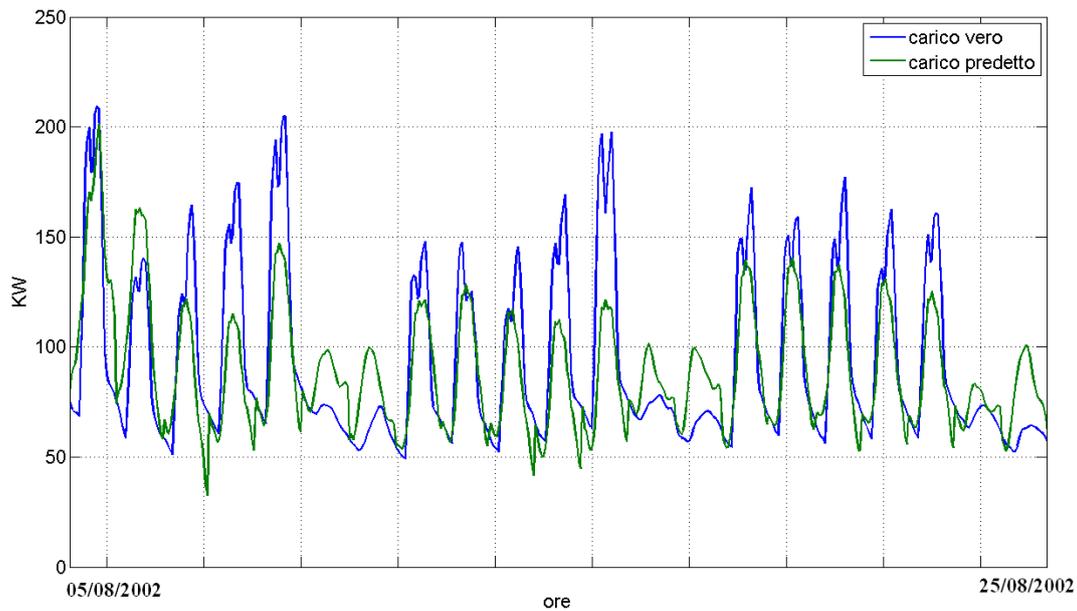


Figura 6.1: Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi CAV (algoritmo PEM)

Sistemi CAV Vengono riportati ora i risultati ottenuti considerando impianti HVAC che utilizzano sistemi CAV come unità di trattamento aria. In figura 6.1 vengono confrontati i dati veri di carico frigorifero e i carichi predetti nel periodo che va dal 05/08/2002 al 25/08/2002. Si nota una sostanziale sottostima in caso di carichi elevati. Questo errore di previsione è dovuto al fatto che esistono notevoli non-linearità tra ingressi e uscite. Con gli algoritmi di identificazione PEM si riescono a ottenere ottimi risultati nel caso di identificazione di sistemi lineari². In questo caso il sistema è fortemente non lineare e questo comporta statistiche non efficienti. A ciò si aggiunge il fatto che i segnali utilizzati per l'identificazione sono poco eccitanti per il sistema: alcuni ingressi (quali ad esempio apporti solari e ventilazione) presentano componenti periodiche e stimolano sempre le medesime frequenze³. In figura 6.2 (a sinistra) vi è il confronto tra medie e massimi giornalieri veri e predetti in una simulazione compiuta in tutto il periodo caldo, da fine Maggio a fine Settembre⁴. È stato poi studiato e analizzato l'errore di predizione. Viene riportata in tabella 6.1 la definizione di carichi orari, medi, massimi e il carico nominale. Vengono definiti i seguenti errori relativi:

- errore relativo rispetto al carico nominale: $\frac{Q_{j,i} - \hat{Q}_{j,i}}{Q_{nom}}$

²Si veda Appendice B

³Per approfondire il concetto sulla persistente eccitazione degli ingressi si veda [26]

⁴In ascissa vi sono i giorni

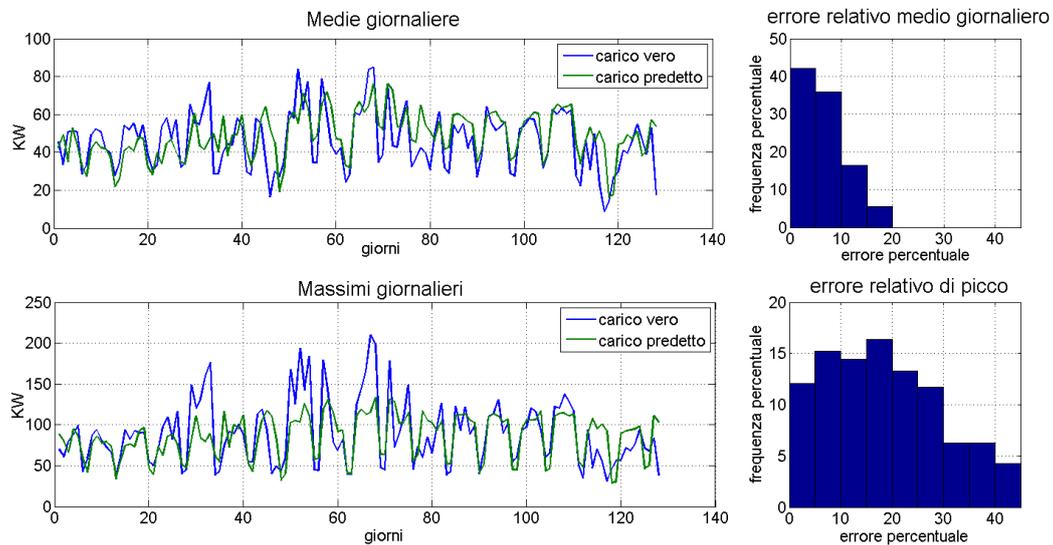


Figura 6.2: Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi CAV (algoritmo PEM)

$Q_{j,i}$	carico vero all'ora j -esima del giorno i -esimo
$\hat{Q}_{j,i}$	carico predetto all'ora j -esima del giorno i -esimo
$Q_{max,i}$	carico massimo giornaliero vero del giorno i -esimo
$\hat{Q}_{max,i}$	carico massimo giornaliero predetto del giorno i -esimo
$Q_{mean,i}$	carico medio giornaliero vero del giorno i -esimo
$\hat{Q}_{mean,i}$	carico medio giornaliero predetto del giorno i -esimo
Q_{nom}	massimo carico vero in tutto l'arco di simulazione

Tabella 6.1: Carichi orari, medi, massimi e carico nominale

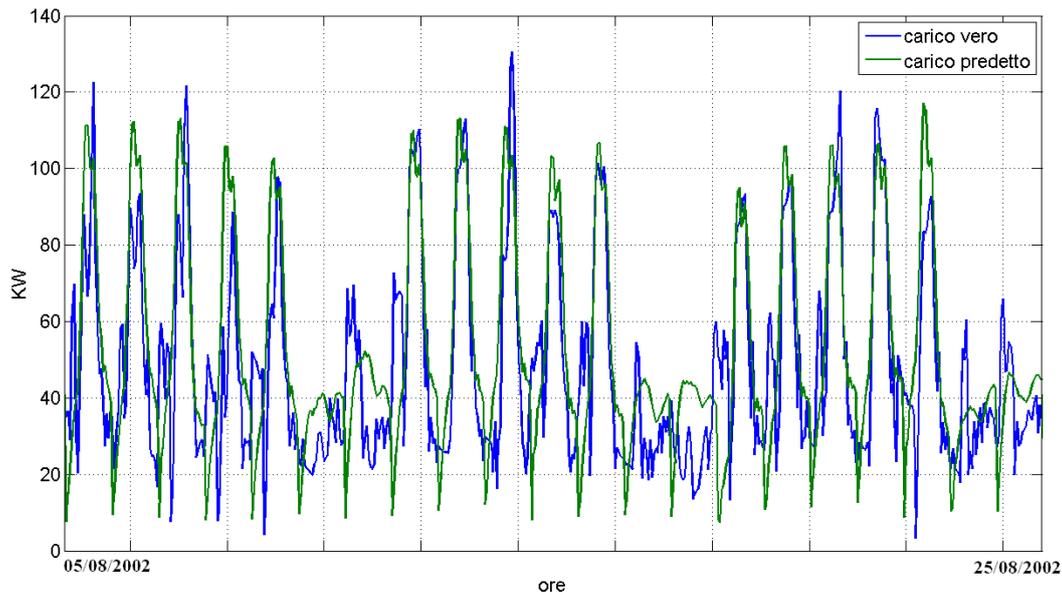


Figura 6.3: Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi VAV con Free Cooling (algoritmo PEM)

- errore relativo medio rispetto al carico nominale: $\frac{Q_{mean,i} - \hat{Q}_{mean,i}}{Q_{nom}}$
- errore relativo di picco rispetto al carico nominale: $\frac{Q_{max,i} - \hat{Q}_{mac,i}}{Q_{nom}}$

Gli istogrammi in figura 6.2 (a destra) rappresentano la frequenza relativa dell'errore medio e massimo rispetto al carico nominale⁵.

Sistemi VAV con Free Cooling In figura 6.3 vi è il risultato della previsione del carico nei sistemi VAV con Free Cooling: come già spiegato in paragrafo 3.1 nei sistemi VAV la portata d'aria ai singoli ambienti viene variata in funzione del carico termico istantaneo; in questo modo si vuole garantire una temperatura all'incirca costante negli ambienti. In caso di Free Cooling se la temperatura esterna si abbassa sotto un certo valore viene aumentata l'introduzione di aria esterna sulla totale (esterna + ricircolata), in modo da ridurre il carico sulle macchine frigorifere.

I risultati sono stati più soddisfacenti in questo caso come si può notare dalla figura 6.4 in cui vi è il confronto delle medie giornaliere e dei massimi con i relativi istogrammi.

⁵Si intende la frequenza relativa delle occorrenze dell'errore: l'errore viene suddiviso in fasce; in ordinata vi è la percentuale delle volte (sul totale) in cui l'errore si trova in quella determinata fascia

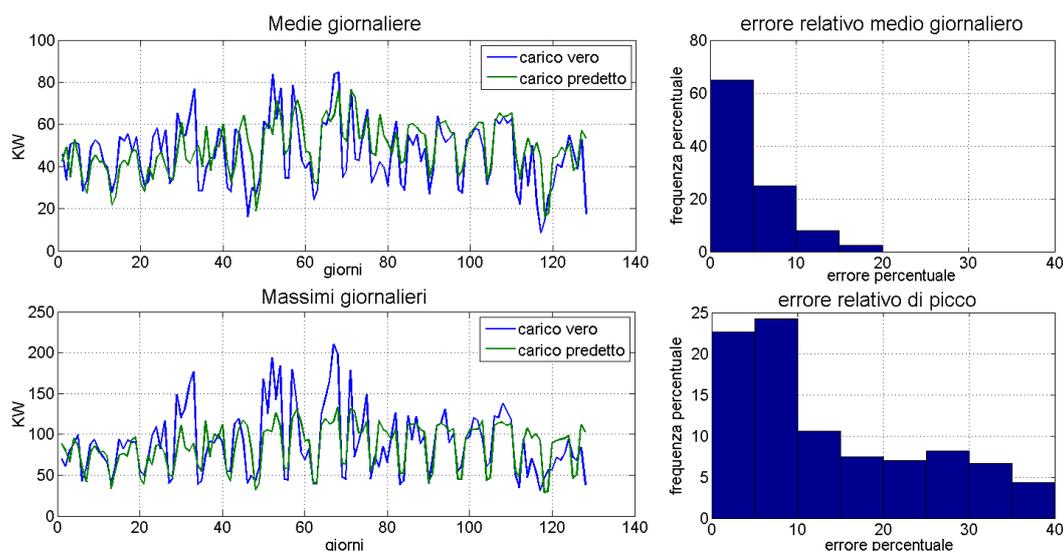


Figura 6.4: Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi VAV con Free Cooling (algoritmo PEM)

6.2 Reti neurali artificiali feedforward

Sistemi CAV Analoghi risultati statistici vengono riportati nel caso di utilizzo di reti neurali feedforward per l'identificazione del modello. In figura 6.5 vi sono i risultati della previsione compiuta tra il 05/08/2002 e il 25/08/2002. Si nota subito il miglioramento ottenuto grazie all'utilizzo delle reti neurali (Cfr. figura 6.1). Le reti neurali risultano ottime per identificare sistemi non lineari⁶. La distribuzione dell'errore medio e di picco confermano i miglioramenti ottenuti (figura 6.6).

Sistemi VAV con Free Cooling Anche nei sistemi VAV con Free Cooling si ottiene un miglioramento dei risultati anche se più cospicuo. In figura 6.7 si possono osservare i grafici dei carichi veri e predetti nelle stesse tre settimane di Agosto. In figura 6.8 vi è il confronto dei massimi e dei valori medi.

⁶Si veda Appendice C

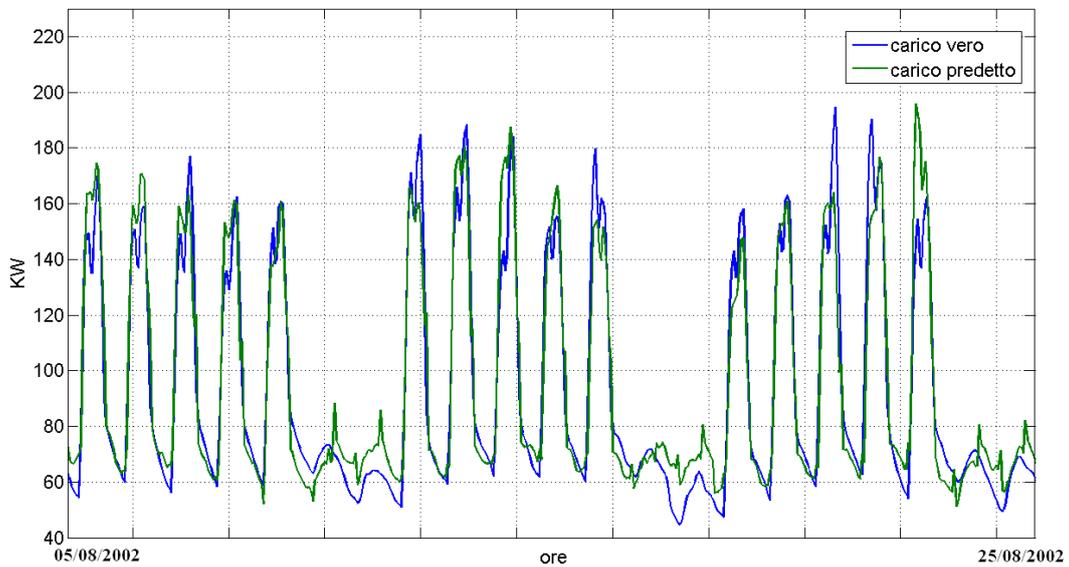


Figura 6.5: Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi CAV (reti feedforward)

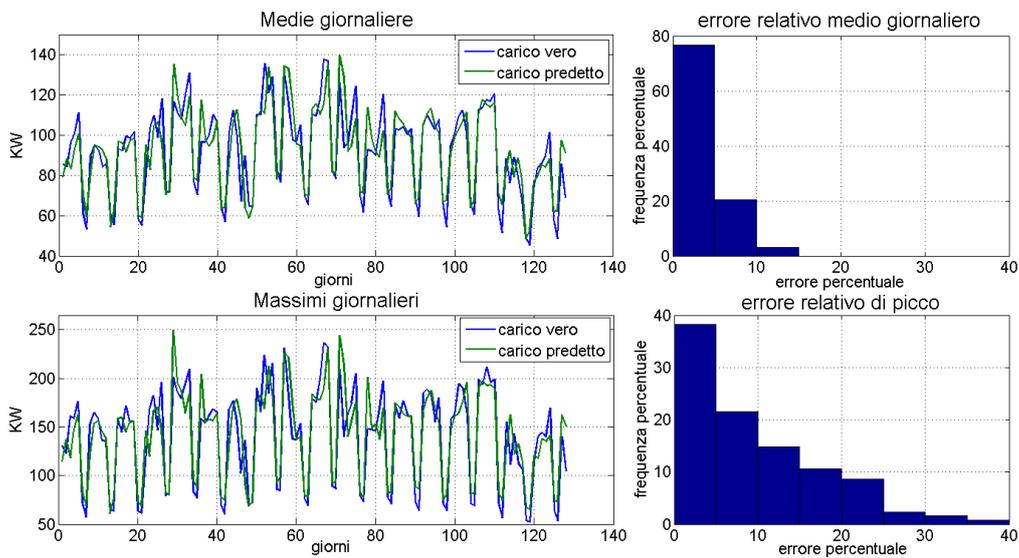


Figura 6.6: Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi CAV (reti feedforward)

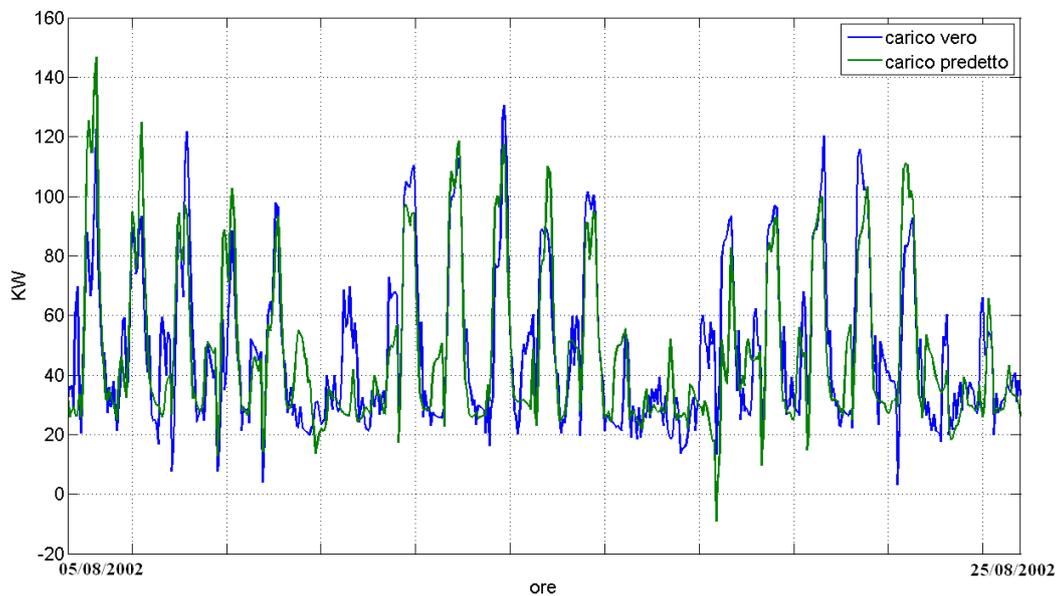


Figura 6.7: Risultati previsione dal 05/08/2002 al 25/08/2002 nei sistemi VAV con Free Cooling (reti feedforward)

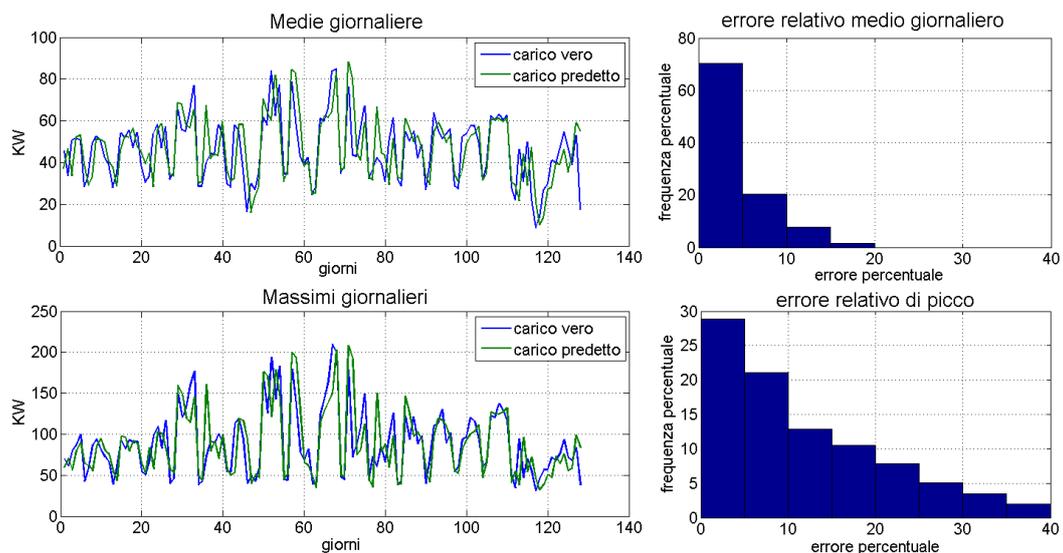


Figura 6.8: Confronto medie, massimi e rispettivi errori da fine Maggio a fine Settembre nei sistemi VAV con Free Cooling (reti feedforward)

6.3 Reti neurali artificiali dinamiche

Come spiegato in Appendice C le reti dinamiche riescono a modellizzare eventuali feedback tra uscite ed ingressi. Si è provato a sperimentare questa tipologia di reti nei sistemi VAV in cui è presente un anello di retroazione tra carico e potenza UTA. Le prestazioni statistiche sono all'incirca analoghe a quelle ottenute con reti feedforward. Le reti feedforward riescono infatti comunque a comprendere le relazioni input/output, memorizzando e quindi riconoscendo in fase predittiva determinate sequenze di dati di input con i rispettivi output.

Si riporta infine in tabella 6.2 a pagina 57 un riepilogo sulle frequenze⁷ relative degli errori considerati, utile per un confronto visivo immediato. Le frequenze degli errori medi e massimi relative agli algoritmi PEM e alle reti neurali feedforward sono state rappresentate graficamente negli istogrammi nei paragrafi 6.1 e 6.2.

Si utilizza la seguente notazione:

- PEM: metodo PEM
- FF: reti neurali feedforward
- D: reti neurali dinamiche

In tabella 6.3 a pagina 58 vi è il riepilogo sulle statistiche per quanto riguarda l'errore di predizione in tutte le ore e considerato solo nei picchi sempre nella simulazione compiuta tra fine Maggio e fine Settembre.

⁷Le percentuali sono approssimate all'unità

SISTEMA CAV											
Frequenza errore su carico nominale				Frequenza errore medio su carico nominale				Frequenza errore di picco su carico nominale			
Fascia di errore	PEM	FF	D	Fascia di errore	PEM	FF	D	Fascia di errore	PEM	FF	D
0 - 5 %	40 %	69 %	69 %	0 - 5 %	42 %	78 %	78 %	0 - 5 %	12 %	38 %	36 %
5 - 10 %	24 %	20 %	20 %	5 - 10 %	36 %	20 %	20 %	5 - 10 %	15 %	21 %	23 %
10 - 15 %	17 %	7 %	7 %	10 - 15 %	17 %	2 %	2 %	10 - 15 %	14 %	15 %	17 %
15 - 20 %	9 %	2 %	2 %	15 - 20 %	5 %			15 - 20 %	16 %	10 %	12 %
20 - 25 %	5 %	1 %	1 %	20 - 25 %				20 - 25 %	13 %	8 %	5 %
25 - 30 %	2 %	1 %	1 %	25 - 30 %				25 - 30 %	12 %	2 %	4 %
30 - 35 %	1 %			30 - 35 %				30 - 35 %	6 %	1 %	1 %
35 - 40 %	1 %			35 - 40 %				35 - 40 %	6 %	1 %	1 %
> 40 %	1 %			> 40 %				> 40 %	6 %	4 %	1 %

SISTEMA VAV (FREE COOLING)											
Frequenza errore su carico nominale				Frequenza errore medio su carico nominale				Frequenza errore di picco su carico nominale			
Fascia di errore	PEM	FF	D	Fascia di errore	PEM	FF	D	Fascia di errore	PEM	FF	D
0 - 5 %	38 %	53 %	55 %	0 - 5 %	65 %	70 %	72 %	0 - 5 %	23 %	29 %	26 %
5 - 10 %	32 %	25 %	24 %	5 - 10 %	25 %	20 %	18 %	5 - 10 %	24 %	21 %	23 %
10 - 15 %	17 %	10 %	11 %	10 - 15 %	8 %	8 %	10 %	10 - 15 %	11 %	13 %	15 %
15 - 20 %	6 %	4 %	4 %	15 - 20 %	2 %	2 %		15 - 20 %	7 %	11 %	11 %
20 - 25 %	3 %	2 %	2 %	20 - 25 %				20 - 25 %	7 %	8 %	8 %
25 - 30 %	2 %	2 %	1 %	25 - 30 %				25 - 30 %	8 %	5 %	5 %
30 - 35 %	1 %	2 %	2 %	30 - 35 %				30 - 35 %	7 %	3 %	5 %
35 - 40 %	1 %	2 %	1 %	35 - 40 %				35 - 40 %	4 %	2 %	2 %
> 40 %				> 40 %				> 40 %	9 %	8 %	5 %

Tabella 6.2: Riepilogo frequenze relative degli errori di predizione

	SISTEMA CAV				SISTEMA VAV (FREE COOLING)			
	PEM	FF	D		PEM	FF	D	
Errore minimo [KW]	0.0332	0.000335	0.0002113		0.0076	0.0013	0.0037	
Errore massimo [KW]	251.4038	89.1196	86.0144		154.0345	119.0882	111.2576	
Media errore [KW]	4.0089	-0.4961	-0.4402		-3.8892	-0.3767	-0.4408	
Deviazione standard [KW]	27.5854	15.8591	16.0157		25.2018	20.4956	20.5543	
Radice errore quadratico medio [KW]	27.8708	15.8643	16.0192		25.4961	20.4957	20.5557	
Errore minimo sui picchi [KW]	0.0240	0.0783	0.6004		0.1412	0.2209	0.0075	
Errore massimo sui picchi [KW]	85.5540	70.3053	77.2650		127.7814	119.0882	110.4673	
Media errore sui picchi [KW]	15.4892	-1.0448	-0.5553		1.8182	-0.1803	0.8949	
Deviazione standard sui picchi [KW]	35.7178	23.0810	23.1826		32.2075	28.3065	26.8474	
Radice errore quadratico medio sui picchi [KW]	38.8035	23.0143	23.0986		32.1329	28.1963	26.7573	

Tabella 6.3: Riepilogo statistiche sull'errore di predizione

6.4 Tempi di calcolo

Si vuole dare un accenno ai tempi di calcolo per l'identificazione del modello nei diversi casi. Nel caso peggiore (in cui si elabora la previsione a fine Settembre) gli algoritmi di identificazione agiscono sui dati di un'intera stagione (a cui corrisponde un numero di dati pari al numero di giorni di simulazione moltiplicati al numero di ore in un giorno essendo che i dati sono orari). I tempi di calcolo per l'identificazione nel caso peggiore sono:

- metodo PEM: 10 [*secondi*] circa
- reti neurali feedforward: 20 [*secondi*] circa
- reti neurali dinamiche: 15 [*minuti*] circa

Le reti neurali dinamiche presentano tempi di calcolo molto elevati. Questo è dovuto al fatto che la propagazione dell'informazione nella rete avviene in entrambe le direzioni.

6.5 Varianti simulative

Accanto alle simulazioni prodotte da DesignBuilder a Venezia su edifici destinati ad attività lavorative, sono state fatte diverse simulazioni in altre località e su edifici residenziali, case private, strutture adibite ad attività sportive, eccetera; sono stati testati i metodi di identificazione descritti per ottenere la previsione del carico nei diversi casi. Le reti neurali si dimostrano ancora efficienti rispetto agli algoritmi PEM. Le forti non-linearità tra le variabili nei sistemi HVAC risultano comprese dagli algoritmi di apprendimento delle reti e la previsione risulta molto buona.

Si è inoltre provato a considerare gli apporti solari come ingressi non conosciuti: in questo caso si suppone di non disporre di un ambiente simulativo (come DesignBuilder) che riesca a quantificare gli apporti solari nelle varie località. Le prestazioni statistiche risultano leggermente peggiori del caso precedente come era prevedibile. La frequenza delle occorrenze dell'errore si abbassa di alcuni valori percentuali (1-2 %) a bassi errori relativi (0-10%) mentre si alzano i valori in corrispondenza ad errori più elevati. I risultati statistici risultano comunque poco differenti.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro di tesi si sono valutati e confrontati alcuni metodi di previsione per il carico frigorifero. In particolare sono stati utilizzati metodi di identificazione PEM e le reti neurali artificiali. Gli algoritmi PEM si sono rivelati non molto buoni per gestire casi con forte non-linearità, presenti negli impianti HVAC. Al contrario con le reti neurali sono stati ottenuti risultati statistici migliori. Il vantaggio delle reti neurali sta nella loro capacità di modellizzare problemi con molte variabili e di captare relazioni non lineari tra queste. Per contro i modelli prodotti dalle reti neurali, anche se molto efficienti, sono poco comprensibili: non è possibile spiegare come e perché siano stati ottenuti determinati risultati. La rete infatti non riesce a spiegare in modo chiaro il funzionamento fisico del sistema. I metodi di identificazione classici come PEM, “grey-box”, “black-box”, ARMAX da questo punto sono più intuitivi perché producono comunque un modello che può essere interpretato fisicamente. Tuttavia il fine di questo lavoro non è lo studio del modello identificato, ma questo è solo uno strumento utile per risolvere un problema applicativo. Il proseguo naturale del presente lavoro è infatti quello di valutare l’inserimento dell’accumulatore nei sistemi HVAC implementati in [24] e in [4]. In particolare bisognerebbe valutare diverse problematiche tra cui:

- costo di installazione;
- stima del risparmio energetico;

La stima del risparmio energetico è necessaria per la valutazione del periodo di ammortizzazione del costo iniziale. Questo può essere fatto facendo diverse simulazioni dell’impianto con l’accumulatore. Tra le problematiche correlate vi sono la quantità di energia frigorifera da accumulare (accumulo totale o

parziale) e lo studio dei periodi di accumulazione per sfruttare le tariffe orarie convenienti.

Appendice A

DesignBuilder e EnergyPlus

A.1 DesignBuilder

DesignBuilder è un'interfaccia grafica che utilizza l'ultima versione del simulatore EnergyPlus per calcolare le prestazioni energetiche degli edifici. I risultati possono essere selezionati e raffigurati oppure esportati in formato elettronico per essere utilizzati da diverse applicazioni (come ad esempio MATLAB). In DesignBuilder possono essere modellate nello spazio 3-D numerose tipologie di edifici e con forme molto diverse tra loro. Realistici elementi tridimensionali forniscono un ritorno visivo dello spessore degli edifici, della dimensione delle stanze e dei volumi; non ci sono limitazioni sulla forma geometrica o sull'aspetto delle pareti. Con DesignBuilder è possibile creare diversi template di simulazione agendo su voci quali tipo di costruzione, attività svolte all'interno, sistemi di illuminazione e HVAC e possono essere applicati cambiamenti a diversi livelli (edificio, blocco, singola zona).

A.1.1 Simulazione e progetto

DesignBuilder permette il calcolo dei carichi degli impianti di riscaldamento e condizionamento utilizzando dati climatici reali per verificare il comportamento dell'edificio sotto effettive condizioni reali. Una ampia casistica di dati di simulazione può essere mostrata in intervalli annuali, mensili, giornalieri, orari o sub-orari:

- il consumo di energia;
- la temperatura interna, quella media radiante, operativa e l'umidità;

- dati climatici del sito;
- trasmissione del calore attraverso le componenti dell'edificio tra cui mura, soffitti, infiltrazioni, eccetera;
- carichi di riscaldamento e raffreddamento;
- produzione di anidride carbonica;
- apporti termici e potenza di unità di trattamento aria;

I dati ambientali sono mostrati senza bisogno di ricorrere all'utilizzo di moduli esterni o all'importazione di dati esterni. La ventilazione naturale può essere modellata con opzioni sulle aperture delle finestre in funzione della temperatura esterna e della temperatura di progetto. Il sistema di vetri comprende la modellizzazione dettagliata di armature e tendaggi. Sono possibili isolamenti e l'utilizzo di vetri che permettono il controllo del flusso di luce cambiando la loro trasparenza (vetri di tipo elettro-cromico). Vi sono sistemi di controllo della luminosità basati su sensori di luminosità disposti nelle diverse zone dell'edificio che permettono un risparmio di energia. Le caratteristiche architettoniche come ad esempio le colonne o le tende da sole possono essere trattate includendo gli effetti di ombra e riflessione.

A.1.2 Dati

Il software comprende data set dell'ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers advances technology to serve humanity and promote a sustainable world) e offre la possibilità di scaricare e installare su richiesta oltre 1300 dati orari di varie località nei diversi continenti. La lista completa dei dati forniti è presentata sul sito del prodotto. Alcuni template permettono all'utente di caricare tipiche costruzioni ad uso abitativo, le diverse attività che vi si svolgono all'interno, tipo di riscaldamento o raffrescamento ed illuminazione.

A.2 EnergyPlus

EnergyPlus è il simulatore di calcolo utilizzato da DesignBuilder. Mentre quest'ultimo presenta una utile interfaccia con cui si possono impostare moltissimi parametri, Energyplus si occupa di tradurre nei calcoli i dati visualizzati

nell'interfaccia. EnergyPlus si basa sui programmi BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2 sviluppati e realizzati tra la fine degli anni '70 ed i primi anni '80 come simulatori di carico e energia.

Appendice B

Algoritmo di identificazione PEM

L'identificazione dei sistemi è una scienza che si prefigge l'obiettivo di stimare modelli di sistemi a partire da dati sperimentali. Essa trova grande applicazione nel settore dell'automatica, ma non solo. Numerosi sistemi infatti sono difficili da modellare tramite le leggi della fisica o troppo complicati: per questo motivo l'identificazione cerca di trovare un modello che si adegui alle misure effettuate. In genere si sceglie un segnale di input al quale sottoporre il sistema e si misurano quindi le sequenze in uscita. Avremo dunque le seguenti sequenze:

- $u(t) = u(1), u(2), \dots, u(N) \text{ --- } > \text{INGRESSI};$
- $y(t) = y(1), y(2), \dots, y(N) \text{ --- } > \text{USCITE};$

dove N rappresenta il numero di misure. Va aggiunto inoltre che bisogna tenere sempre conto che le misure non sono perfette ma inevitabilmente affette da rumore. Queste sequenze sono dunque i parametri di input per la procedura di identificazione. Possiamo distinguere tre tipologie di procedure di identificazione:

1. Identificazione a scatola bianca (“white-box”): il modello viene ricavato tramite le leggi della fisica;
2. Identificazione a scatola grigia (“grey-box”): conosciamo la struttura del modello ma non sono noti solo alcuni parametri che vogliamo stimare;
3. Identificazione a scatola nera (“black-box”): non conosciamo nulla sul sistema;

Nel caso in cui abbiamo già una struttura del modello per il sistema o ne abbiamo supposta una e abbiamo bisogno di ricavare una serie di parametri si parla di identificazione parametrica.

Una procedura di identificazione deve necessariamente prevedere una fase di validazione del modello ottenuto, tramite la quale stabiliamo la bontà del modello ed eventualmente ne cambiamo la struttura o effettuiamo nuovi esperimenti. La validazione va in genere fatta non con gli stessi dati usati per l'identificazione ma con nuove misure. Per quanto riguarda la procedura di identificazione esistono numerose metodologie. Ad esempio per la stima parametrica vi sono alcuni algoritmi come ad esempio il metodo PEM.

Il Prediction Error Method (letteralmente: metodo dell'errore di predizione), spesso siglato come PEM, è un metodo di stima parametrica di un modello: in pratica si suppone nota la struttura e si vogliono identificare i parametri partendo da dati sperimentali (misurati) sulle uscite ottenute a partire dagli ingressi da noi scelti per eccitare il sistema. L'idea sta nel costruire, a partire dalla struttura di modello scelta (secondo particolari criteri), un predittore ovvero un sistema che, date le uscite e gli ingressi passati, fornisce una stima dell'uscita presente. Il metodo PEM stima i parametri cercati minimizzando gli errori di predizione, ovvero minimizzando un funzionale di costo dipendente da questi errori che a loro volta sono funzione dei parametri incogniti e delle misure.

Inizialmente viene definito il predittore $\hat{y}(t)$ in funzione dei dati passati:

$$\hat{y}(t) = f(y(t-1) \dots y(1), u(t-1) \dots u(1)) \quad (\text{B.1})$$

Si suppone che il predittore $\hat{y}(t)$ sia una funzione lineare delle osservazioni degli ingressi e uscite passati:

$$\hat{y}(t) = \hat{y}_\theta(t) = \varphi^T(t)\theta \quad (\text{B.2})$$

dove:

$$\varphi^T(t) = [y(t-1) \dots y(1), u(t-1) \dots u(1)] \quad (\text{B.3})$$

e θ è il vettore dei coefficienti degli ingressi e uscite passati. Viene dunque definito l'errore di predizione sul parametro θ :

$$\epsilon_\theta(t) = y(t) - \varphi^T(t)\theta \quad (\text{B.4})$$

dove $y(t)$ indica il valore vero misurato. Viene infine aggiornato il parametro θ minimizzando l'errore quadratico medio di predizione:

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon_{\theta}^2(t) \quad (\text{B.5})$$

dove N è il numero dei dati in ingresso e uscita a disposizione.

Appendice C

Reti neurali artificiali

Le reti neurali artificiali (ANN “Artificial Neural Networks” in inglese) sono modelli matematici che rappresentano l’interconnessione tra elementi definiti neuroni artificiali, ossia costrutti matematici che in qualche misura imitano le proprietà dei neuroni viventi. Questi modelli matematici possono essere utilizzati sia per ottenere una comprensione delle reti neurali biologiche, ma ancor di più per risolvere problemi ingegneristici di intelligenza artificiale come quelli che si pongono in diversi ambiti tecnologici (in elettronica, informatica, simulazione, e altre discipline). Una rete neurale artificiale può essere realizzata sia da programmi software che da hardware dedicato (DSP, Digital Signal Processing). Nella maggior parte dei casi una rete neurale artificiale è un sistema adattivo che cambia la sua struttura basata su informazioni esterne o interne che scorrono attraverso la rete durante la fase di apprendimento. In termini pratici le reti neurali sono strutture non-lineari di dati statistici organizzate come strumenti di modellazione. Esse possono essere utilizzate per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare. Sono molto utili in caso di identificazione “black-box” cioè quando a priori non si conosce nulla del modello. Una rete neurale artificiale riceve segnali esterni su uno strato di nodi (unità di elaborazione) d’ingresso, ciascuno dei quali è collegato con numerosi nodi interni, organizzati in più livelli. Ogni nodo elabora i segnali ricevuti e trasmette il risultato a nodi successivi.

Il principio di funzionamento della rete neurale è rappresentato in figura C.1. Dati uno o più ingressi (input) e una o più uscite (target), la rete si aggiorna in linea aggiustando i suoi pesi per riprodurre la funzione che approssima meglio la relazione input/target. Ad esempio in figura C.2 è rappresentata una rete a

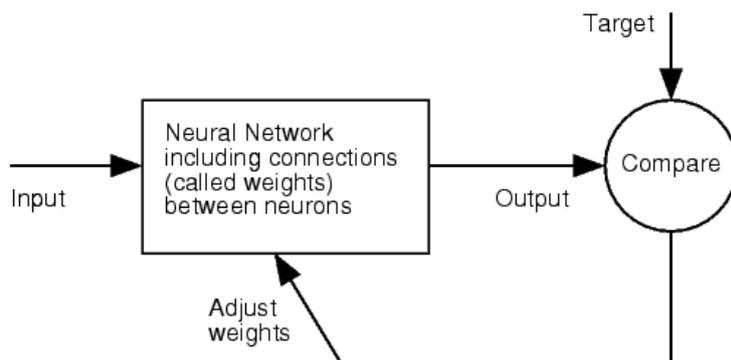


Figura C.1: Schema di funzionamento di una rete neurale

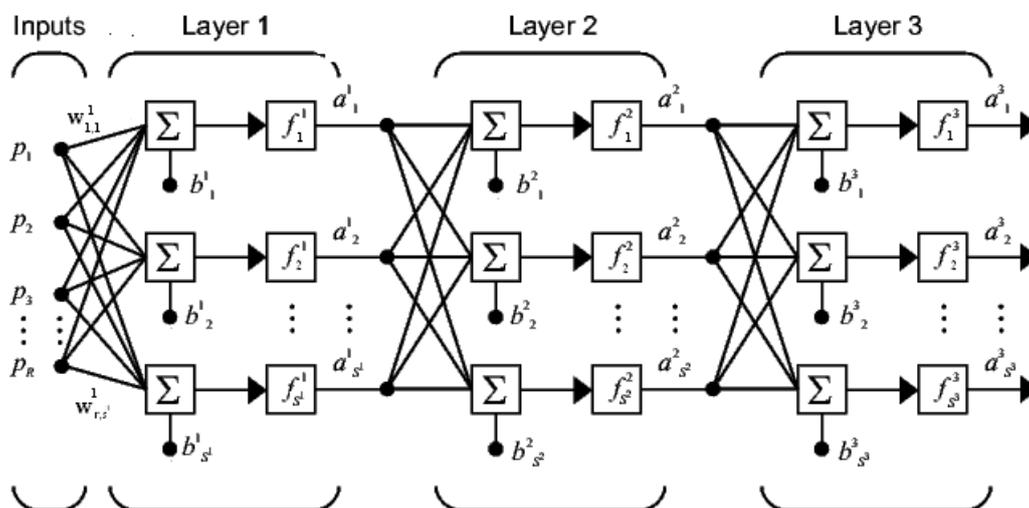


Figura C.2: Esempio di rete a tre livelli

tre livelli. Ogni neurone è caratterizzato da una matrice riga di pesi (weight) W (indica in che modo vengono pesati gli ingressi al neurone), un valore di bias b , e un uscita a . La rete raffigurata ha r input, s^1 neuroni nel primo livello, s^2 neuroni nel secondo livello ed s^3 neuroni nel terzo livello. Da notare che l'output del primo e del secondo livello è l'input del livello successivo.

Il secondo livello può essere analizzato come una rete a un livello con s^1 input, s^2 neuroni e s^2 vettori riga di pesi (uno per ogni neurone). Questo ragionamento può essere fatto per ogni livello. La relazione tra ingressi e uscita di ogni neurone può essere sintetizzata nella seguente equazione:

$$a_j^i = f_j^i \left(\sum_{k=1}^{s^{i-1}} w_{k,j}^i a_k^{i-1} + b_j^i \right) \quad (C.1)$$

in cui viene indicato con:

- a_j^i : l'uscita del j -esimo neurone al i -esimo livello;
- f_j^i : la funzione di uscita del j -esimo neurone al i -esimo livello;
- s^{i-1} : il numero di ingressi al i -esimo livello;
- $w_{k,j}^i$: il peso (weight) del k -esimo ingresso del j -esimo neurone al i -esimo livello;
- b_j^i : il bias del j -esimo neurone al i -esimo livello;

I livelli di una rete neurale coprono ruoli differenti. Il livello che produce i valori di uscita viene denominato output-layer, mentre gli altri vengono denominati hidden-layers. La rete in figura C.2 ha tre livelli di cui primi due hidden. Qualche autore designa i valori di input come un altro livello (input-layer).

Principali tipologie di reti neurali

Feedforward neural networks

Le feedforward neural networks sono state le prime e le più semplici tipologie di reti artificiali progettate. In queste reti, l'informazione muove solamente in una direzione, dagli ingressi alle uscite, attraverso gli hidden-layers e fino all'output layer. Non vi sono cicli o loop.

Dynamic neural networks

Al contrario delle reti feedforward, le reti dinamiche sono modelli con propagazione dell'informazione in entrambe le direzioni. Sono utili nel caso vi sia un feedback tra uscite ed ingressi, come nello schema rappresentato in figura C.3

Radial basis networks

Una radial basis network è una rete artificiale che usa radial basis functions (RBF) come funzioni di attivazione. Una RBF è una funzione i cui valori dipendono solo dalla distanza da un punto, chiamato centro. Le RBF hanno di solito tre livelli: uno di input, uno hidden e l'ultimo di output.

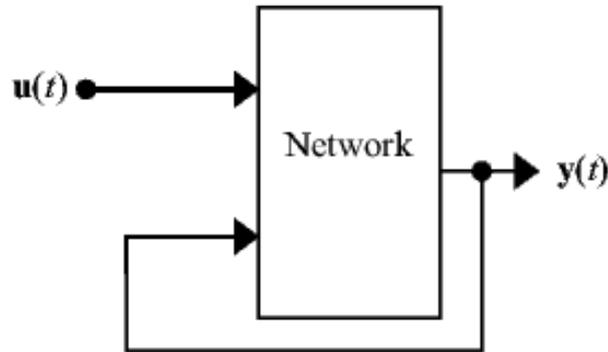


Figura C.3: Schema di funzionamento di una rete dinamica

Algoritmo di backpropagation

L'algoritmo di backpropagation (propagazione dell'errore) è il principale e il più diffuso algoritmo di apprendimento delle reti neurali. Per apprendimento si intende la modifica dei pesi delle connessioni in modo tale che si minimizzi una certa funzione di errore E dipendente dai pesi della rete. Tale funzione dipende dal vettore h -esimo di output (y_h) restituito dalla rete, dato il vettore h -esimo di ingresso (x_h) e dal vettore h -esimo di target (t_h) (che fa parte del training set). Il training set è dunque un insieme di N coppie di vettori (x_h, t_h) , con $h = 1, \dots, N$. La funzione errore che si deve minimizzare si può scrivere come:

$$E = \frac{1}{2} \sum_h \sum_k (t_{h,k} - y_{h,k})^2 \quad (\text{C.2})$$

dove l'indice k rappresenta il valore corrispondente al k -esimo neurone di output. Per minimizzare l'errore si possono utilizzare diverse tecniche di ottimizzazione tra cui per esempio l'algoritmo di discesa del gradiente (gradient-descent).

Appendice D

Stimatore asintotico dello stato

Viene descritta brevemente la costruzione dello stimatore dello stato di ordine intero (per approfondimenti si veda [9]).

Si consideri il modello di stato a tempo discreto del processo¹:

$$\begin{cases} x(k+1) = Fx(k) + Gu(k) & , k \in \mathbb{Z} \\ y(k) = Hx(k) \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

Viene costruito ora un sistema copia che prevede la correzione della stima attraverso la matrice L :

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= F\hat{x}(k) + Gu(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)) \\ &= [F - LH]\hat{x}(k) + Gu(k) + Ly(k) \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

L'errore di stima vale $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$:

$$\begin{aligned} e(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\ &= [F - LH]x(k) - [F - LH]\hat{x}(k) \\ &= [F - LH]e(k) \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

Il progetto di L deve garantire che la matrice della dinamica dell'errore $F - LH$ abbia tutti gli autovalori $|\lambda[F - LH]| < 1$. In questo caso si ha infatti che l'errore di stima converge: $\lim_{k \rightarrow \infty} e(k) = 0$. Lo stimatore è inoltre detto di ordine intero poichè ha dimensione pari a quella del sistema Σ . Lo schema di principio dello stimatore (indicato con $\hat{\Sigma}$) di un sistema Σ è riportato in figura D.1.

¹Senza perdita di generalità si trascura il legame diretto (attraverso la matrice D) tra ingresso e uscita

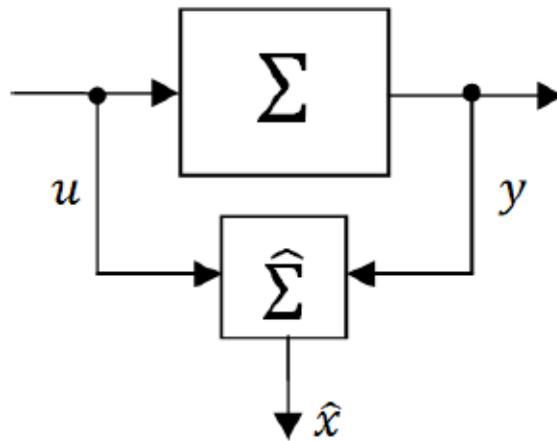


Figura D.1: Connessioni con il sistema da stimare: stimatore asintotico dello stato

Bibliografia

- [1] M. Albieri, A. Beghi, C. Bodo, L. Cecchinato. “Advanced control systems for single compressor chiller units”. *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 5, pp. 1068–1076, 2009.
- [2] A. Azadeh, S.F. Ghaderi, S. Tarverdian, M. Saberi. “Integration of artificial neural networks and genetic algorithm to predict electrical energy consumption”. *Applied Mathematics and Computation*, vol. 186, no. 2, pp. 1731–1741, 2007.
- [3] A.E. Ben-Nakhi, M.A. Mahmoud. “Cooling load prediction for buildings using general regression neural networks”. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 13–14, pp. 2127–2141, 2004.
- [4] M. Bertinato. *Algoritmi genetici per l’ottimizzazione di sistemi di supervisione per impianti HVAC*. Tesi di laurea specialistica in Ingegneria dell’automazione, Università degli studi di Padova, 2007/2008.
- [5] J.E. Braun, N. Chaturvedi. “An inverse gray-box model for transient building load prediction”. *HVAC&R Research*, vol. 8, no. 1, pp. 73–99, 2002.
- [6] A. Cavallini. *Tipologie di distribuzione/configurazioni impiantistiche, circuiti primario e secondario*. Seminar presentation slides, at AERMEC S.p.A, 2004.
- [7] B.B. Ekici, U.T. Aksoy. “Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks”. *Advances in Engineering Software*, vol. 40, no. 5, pp. 356–362, 2009.
- [8] L. Ekonomou. “Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks”. *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 512–517, 2010.

-
- [9] E. Fornasini, G. Marchesini. *Appunti di teoria dei sistemi*. Edizioni Libreria Progetto, Padova, 2003.
- [10] J.R. Forrester, W.J. Wepfer. “Formulation of a load-prediction algorithm for a large commercial-building”. *ASHRAE Transactions*, vol. 90, no. 2, pp. 536–551, 1984.
- [11] M. Ghiassi, D.K. Zimbra, H. Saidane. “Medium term system load forecasting with a dynamic artificial neural network model”. *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 5, pp. 302–316, 2006.
- [12] Z. Hou, Z. Lian, Y. Yao, X. Yuan. “Cooling-load prediction by the combination of rough set theory and an artificial neural-network based on data-fusion technique”. *Applied Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 1033–1046, 2006.
- [13] A.H. Kah, Q.Y. San, S.C. Guan, W.C. Kiat, Y.C. Koh. “Smart air-conditioning system using multilayer perceptron neural network with a modular approach”. *Neural Networks, Proceedings., IEEE International Conference on*, vol. 5, pp. 2314–2319, 1995.
- [14] S.A. Kalogirou, M. Bojic. “Artificial neural networks for the prediction of the energy consumption of a passive solar building”. *Energy*, vol. 25, no. 5, pp. 479–491, 2000.
- [15] N. Kandil, R. Wamkeue, M. Saad, S. Georges. “An efficient approach for short term load forecasting using artificial neural networks”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 8, pp. 525–530, 2006.
- [16] S. Karatasou, M. Santamouris, V. Geros. “Modeling and predicting building’s energy use with artificial neural networks: Methods and results”. *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 8, pp. 949–958, 2006.
- [17] J.F. Kreider, X.A. Wang. “Artificial neural network demonstration for automated generation of energy use predictors for commercial buildings”. In: Haberl JS, Nelson RM, Culp CC, editors. *The use of artificial intelligence in building systems*. ASHRAE, pp. 193–198, 1995.
- [18] Q. Li, Q. Meng, J. Cai, H. Yoshino, A. Mochida. “Predicting hourly cooling load in the building: A comparison of support vector machine and

- different artificial neural networks”. *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 1, pp. 90–96, 2009.
- [19] L. Ljung. *System Identification: Theory for the User*. 2nd Edition, PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [20] J.W. MacArthur, A. Mathur, J. Zhao. “On-line recursive estimation for load profile prediction”. *ASHRAE Transactions*, vol. 95, no. 1, pp. 621–628, 1989.
- [21] P. Mandal, T. Senjyu, N. Urasaki, T. Funabashi. “A neural network based several-hour-ahead electric load forecasting using similar days approach”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 6, pp. 367–373, 2005.
- [22] G.A. Mian. *Appunti di Elaborazione Numerica dei Segnali*. Edizioni Libreria Progetto, Padova, 1998.
- [23] N. Nakahara. “Load prediction for optimal thermal storage: comparison of three kinds of model application”. *Proc. Build. Simulat.* 99, p. D16, 1999.
- [24] A. Nicolettis. *Metodi e algoritmi per la supervisione di sistemi HVAC*. Tesi di laurea specialistica in Ingegneria dell’automazione, Università degli studi di Padova, 2006/2007.
- [25] Z.H. Osman, M.L. Awad, T.K. Mahmoud. “Neural network based approach for short-term load forecasting”. *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09. IEEE/PES*, pp. 1–8, 2009.
- [26] G. Picci. *Metodi statistici per l’identificazione di sistemi lineari*. Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, Università degli studi di Padova, 2008.
- [27] K.B. Song, Y.S. Baek, D.H. Hong, G. Jang. “Short-Term Load Forecasting for the Holidays Using Fuzzy Linear Regression Method”. *IEEE transactions on power systems*, vol. 20, no. 1, pp. 96–101, 2005.
- [28] L. Stefanutti. *Applicazioni di impianti di climatizzazione*. Edizione Tecniche Nuove (Impianti), 1996.

-
- [29] J.W. Taylor, R. Buizza. “Neural network load forecasting with weather ensemble predictions”. *IEEE transactions on power systems*, vol. 17, no. 3, pp. 626–632, 2002.
- [30] E. Toffoli. *Tecniche di identificazione applicate alle problematiche di comfort, efficienza e certificazione energetica nei sistemi edificio impianto*. Tesi di laurea, Università degli studi di Padova, 2007/2008.
- [31] L. Wei, Z. Zhen-gang. “Based on time sequence of ARIMA model in the application of short-term electricity load forecasting”. *Research Challenges in Computer Science, ICRCCS '09. International Conference on*, pp. 11–14, 2009.
- [32] Y. Yao, Z. Lian, Z. Hou, W. Liu. “An innovative air-conditioning load forecasting model based on RBF neural network and combined residual error correction”. *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 4, pp. 528–538, 2006.
- [33] Q. Zhou, S. Wang, X. Xu, F. Xiao. “A grey-box model of next-day building thermal load prediction for energy-efficient control”. *International Journal of Energy Research*, vol. 32, no. 15, pp. 1418–1431, 2008.
- [34] *System identification applied to building performance data*. Edited by J.J. Bloem, Institute for Systems Engineering and Informatics, Joint Research Centre, European Commission, 1994.
- [35] *System identification competition*. Edited by J.J. Bloem, Institute for Systems Engineering and Informatics, Joint Research Centre, European Commission, 1996.

Ringraziamenti

Alla conclusione del lavoro di tesi, desidero ringraziare la mia famiglia perchè mi ha portato un grande sostegno in questi anni di università.

Grazie al Prof. Alessandro Beghi, che mi ha offerto una straordinaria opportunità e si è sempre dimostrato disponibile nei miei confronti. Ringrazio inoltre il Dr. Luca Cecchinato, che mi ha seguito dal punto di vista tecnico durante la tesi, e Mirco Rampazzo, Post-Doc, con cui mi sono trovato a parlare molte volte di problemi inerenti al lavoro di tesi, e mi ha sempre saputo ascoltare.

Infine desidero ringraziare tutti quelli con cui ho condiviso il mio percorso: parenti, amici e compagni di università, con i quali ho trascorso periodi impegnativi di studio ma anche momenti di vita fantastici.