



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAGLIARI



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**Modellazione, simulazione
e gestione di reti
di scaldacqua elettrici**

RELATORE:

PROF. ALESSANDRO GIUA

CORRELATORE:

ING. Mauro Franceschelli

TESI DI LAUREA DI:

Domingo Palmas

Anno Accademico 2012/2013

Indice

Ringraziamenti	7
1 Introduzione	9
2 Modellazione del consumo energetico di scaldacqua	15
2.1 Modellazione del consumo idrico	17
2.2 Componenti nucleo familiare	19
3 Descrizione del simulatore	23
3.1 Consumi	26
4 Controllo di reti di scaldacqua	29
5 Simulazione del sistema e risultati	35
6 Conclusioni	39
7 Appendici	41
7.1 Integrazione numerica	41
7.2 Codice	50

Abstract

Il problema della gestione del carico da parte delle società di distribuzione di energia elettrica è stato affrontato da tempo in diversi modi.

Un carico domestico che si rivela essere adatto ad essere gestito da parte del Fornitore, è lo scaldacqua elettrico.

In questa tesi si costruisce un simulatore che, a partire da una curva dei consumi stocastici d'acqua calda, determina l'andamento durante le 24 ore dei consumi stocastici degli scaldacqua elettrici di un campione di 1673 utenze.

In base ai consumi domestici totali e rispetto ad una previsione di produzione si determinerà una politica di gestione di tali consumi (Demand Side Management, DSM), che cerca di far coincidere la curva dei consumi con la previsione di produzione, nel rispetto di alcuni vincoli.

L'implementazione di tale gestione consentirebbe al Fornitore, seppure entro certi limiti, di esercitare una significativa influenza sulla distribuzione dei consumi nell'arco delle 24 ore, adattando il carico al riferimento previsto e traendo da tale adattamento benefici anche di carattere economico.

Definito l'errore come integrale della differenza tra la curva dei consumi e la previsione di produzione, si riscontrerà nei risultati una sua significativa diminuzione, dal confronto tra il caso in cui non si esercita alcuna politica di gestione del carico ed il caso in cui si applica il tipo di gestione suggerita in questa tesi.

Ringraziamenti

Si ringrazia Enel Distribuzione per aver fornito dati utili ai fini di un realistico inquadramento quantitativo di questa tesi.

Si ringrazia l'Ing. Gianluca Mereu per la graditissima disponibilità e i suggerimenti.

Capitolo 1

Introduzione

Le tematiche ambientali negli ultimi anni sono diventate di notevole rilevanza; in particolare quelle legate all'effetto serra, alle sue cause ed alle sue possibili soluzioni. Fra queste ultime ricordiamo l'utilizzo di fonti rinnovabili in luogo di quelle fossili, la riduzione dei consumi e l'aumento dell'efficienza energetica sia dei sistemi che utilizzano l'energia sia della rete che la distribuisce.

Per quanto riguarda la rete di distribuzione italiana è stato introdotto da alcuni anni un sistema di fasce orarie atte ad incentivare economicamente i consumi nelle ore in cui il carico è generalmente più basso e disincentivarli nelle ore in cui è più alto, con lo scopo di ridistribuire più uniformemente il carico durante le 24 ore. Tale ridistribuzione consentirebbe di sfruttare al meglio il sistema di produzione e distribuzione dell'energia, consumando maggiormente quella derivante da centrali di base (ad esempio nucleari o a carbone) che ha un minor costo rispetto all'energia prodotta da centrali atte a soddisfare repentini picchi di carico (ad esempio centrali con turbine a gas). Il limite del suddetto sistema di fasce orarie sta nel fatto che l'utente è incentivato a spostare i consumi nei periodi di basso carico, ma tale azione è facoltativa; di conseguenza il sistema di produzione e distribuzione dell'energia dovrà tener conto che certi picchi di carico possono comunque verificarsi.

In altri Paesi è presente già da tempo il cosiddetto Demand Side Management (DSM) ovvero un sistema che consente alle società di distribuzione dell'energia di

influire sul carico, riducendolo nelle ore di punta ed eventualmente ridistribuendo l'energia da fornire in momenti successivi.

Un carico domestico ideale per questo tipo di applicazione è lo scaldacqua elettrico[**Nehrir:article**]; esso infatti è in grado di accumulare energia sotto forma di acqua calda e di restituirla successivamente; cioè l'utilizzo dell'energia accumulata può essere differito nel tempo rispetto alla fase di accumulo. Ha inoltre una dinamica sufficientemente lenta, tale quindi da non risentire eccessivamente di brevi interruzioni nella fase di accumulo di energia; può dunque essere disinserito temporaneamente per riprendere in un momento seguente la sua fase di accumulo. Nelle regioni con climi freddi il carico energetico degli scaldacqua elettrici è particolarmente rilevante e può rappresentare anche il 30% dell'intero carico domestico [**Paull:article**],[**Nehrir:article**].

Una gestione di questo tipo consente quindi alle società di distribuzione di energia di programmarne preventivamente l'acquisto riducendo così, sia i costi di approvvigionamento che la necessità di "inseguire" il carico.

Uno dei vincoli che tale management deve rispettare è la disponibilità di acqua calda per l'utente che non deve essere penalizzato oltremodo, pena la verosimile mancata accettazione da parte dell'utente del servizio in questione; infatti tale servizio dovrebbe essere proposto all'utente in cambio ad esempio di sconti sul prezzo dell'energia, così come la tariffa a fasce orarie.

E' dunque necessario poter disporre di un sistema che consente di pilotare il carico rappresentato dagli scaldacqua elettrici delle varie utenze servite in funzione dell'errore, inteso come scostamento della curva dei consumi totali da quella dell'energia che si prevedeva di fornire.

Per affrontare questo problema sono state proposte e studiate diverse alternative, fra cui le seguenti: [**Paull:article**],[**Ericson:article**],[**Dolan:article**],[**Newsham:article**],[**Lee:article**],[**Lane:article**].

In [**Paull:article**] si sviluppa un modello predittivo non aggregato, in cui ogni utente ha le sue peculiari caratteristiche rilevate attraverso una ispezione del singolo sito ed in cui lo scaldacqua viene controllato con segnali in alta frequenza inviati attraverso la rete tramite sensori intelligenti che rilevano il carico domestico

ogni 15 minuti.

In [**Ericson:article**] si sviluppa un modo per calcolare l'impatto della riduzione del carico e il conseguente effetto dovuto al reinserimento degli scaldacqua che dovrà poi essere gestito con cicli di controllo. Si tiene conto infatti che non tutti gli scaldacqua risultano essere sempre inseriti e, quindi, non sempre ad un segnale di disinserimento corrisponde una riduzione del carico; inoltre l'effetto del payback comporta nuovi picchi di carico che vanno gestiti.

In [**Dolan:article**] è stato usato il metodo statistico Monte Carlo per ottenere un modello aggregato dei consumi degli scaldacqua domestici.

In [**Newsham:article**] è stata analizzata la possibilità di ridurre i picchi di carico domestico agendo sui condizionatori d'aria anziché sugli scaldacqua elettrici.

In [**Lee:article**] è stata analizzata la possibilità di controllare gli scaldacqua elettrici a gruppi ed è stato analizzato il payback risultante, sia dal punto di vista della sua entità ma anche riguardo al momento in cui si presenta.

In [**Lane:article**] si usa un modello statistico aggregato del carico derivante da utilizzo d'acqua calda; si rileva inoltre da indagini domestiche su campioni di utenti, la motivazione dell'utilizzo dell'acqua per ottenere una curva che rappresenta l'utilizzo medio dell'acqua calda durante l'arco delle 24 ore.

In [**Gomes:article**] si pone l'accento anche su aspetti economici di un eventuale applicazione di un DSM (tipo ON OFF su gruppi di utenze), valutandone quantitativamente gli effetti sui ricavi ottenuti dall'energia venduta.

In [**Nehrir:article**] si propone una strategia che controlla gli scaldacqua tramite microprocessori installati su di essi, che prendono come ingressi i set di temperatura (massima e minima), la temperatura corrente dell'acqua calda e la situazione del carico totale nella rete che si vuole gestire; come uscita il processore produrrà un segnale che, inviato ad un alimentatore consente di modulare la tensione di alimentazione della resistenza dello scaldacqua. Tale controllo viene effettuato per blocchi di scaldacqua e il loro carico aggregato viene traslato in diversi periodi della giornata, in modo da livellare il carico totale durante le 24 ore.

In [**Hashem_Nehrir:article**] partendo dalla constatazione che i picchi di

carico totale nella rete corrispondono ai picchi del carico derivante dai soli scaldacqua, si valuta l'efficacia di un controllo basato sulla tensione di alimentazione; si propongono per una eventuale implementazione, scaldacqua con duplice elemento riscaldante e selettori in grado di variare la potenza della resistenza utilizzabili direttamente dagli utenti; questi ultimi dovrebbero essere preventivamente sensibilizzati e incentivati economicamente a passare da una situazione di elevato ad una di basso consumo nei momenti di picchi di carico.

In questa tesi ci si è basati sul fatto che i consumi elettrici e idrici pur essendo stocastici, per le varie tipologie di giornata (ad esempio giorni feriali, fine settimana estivi o invernali) risultano essere simili; è dunque ragionevole ipotizzare un profilo dei consumi previsto per tali tipologie di giornata. Pertanto, si può determinare istante per istante, un vettore di elementi ON/OFF da inviare alla rete degli scaldacqua tale da far coincidere la curva dei consumi con il riferimento stabilito preventivamente per l'energia fornita.

In questo modo sarà più agevole per chi distribuisce l'energia soddisfare eventuali ulteriori variazioni rispetto al riferimento; un sistema del genere consente di traslare nel tempo un picco di richiesta dell'energia, da un periodo in cui è molto oneroso da soddisfare (sia in termini tecnici che economici) ad un periodo in cui lo è meno. L'energia fornita totale potrà essere la stessa, ma una sua più consona distribuzione nel tempo può risultare meno onerosa da soddisfare.

Per ottenere ciò occorre simulare il carico stocastico aggregato derivante dall'utilizzo degli scaldacqua: da alcune pubblicazioni consultate [**Dolan:article**],[**Paull:article**] emerge che tale simulazione è più realistica se fatta a partire dai consumi d'acqua calda che generano i consumi elettrici degli scaldacqua. Pertanto occorrerà preventivamente simulare dei verosimili consumi d'acqua calda e da essi ricavare i consumi degli scaldacqua. Per ricavare il carico domestico totale stocastico si può sommare al carico degli scaldacqua quello degli altri carichi domestici.

Fatto questo, si ha a disposizione un sistema in grado di simulare l'andamento del carico stocastico totale di una ipotetica smart city; su di esso si potrà simulare l'effetto dell'applicazione del sistema di DSM e confrontare il risultato col caso in

cui tale gestione non venga applicata.

Dalle varie simulazioni si evince che, applicando la matrice trovata alle diverse realizzazioni dei consumi totali l'errore, inteso come integrale della differenza fra la curva del carico e quella di riferimento, si riduce anche drasticamente, dipendentemente dai vincoli che ci si impone di rispettare.

Come detto, in alcuni Paesi il DSM è presente da diverso tempo e quindi anche la rete di distribuzione è stata progettata tenendo conto di questa opportunità; ad esempio in Nuova Zelanda [theguardian.com:theguardian], [industryweek.com:industryweek], [ea.govt.nz:governoNZ] la rete domestica è dotata di due linee, una dedicata al solo scaldacqua e l'altra per tutti gli altri carichi in modo da favorire l'implementazione dei sistemi di DSM. Laddove non è presente una infrastruttura simile (come ad es in Italia) per ridurre i costi di implementazione si potrà far ricorso alla domotica e/o a tecnologie di controllo Wi-Fi.

Questa tesi proseguirà col capitolo 1 in cui troverà posto una descrizione del modello; nel capitolo 2 ci sarà una descrizione del simulatore e una delle leggi di controllo nel capitolo 3; a seguire verranno illustrati i risultati nel capitolo 4 e le conclusioni con cenni ad eventuali sviluppi futuri. In appendice una breve dissertazione sui metodi di integrazione numerica ed il codice Matlab del simulatore.

Capitolo 2

Modellazione del consumo energetico di scaldacqua

In questo capitolo si modella il comportamento dello scaldacqua elettrico tramite una possibile equazione caratteristica; inoltre si modella il consumo dell'acqua calda, tenendo conto del suo sistema di erogazione e del numero di utenti che ne fanno uso.

Uno dei vincoli che ci si pone nel progettare un sistema di DSM è quello del comfort dell'utente, che non deve essere eccessivamente penalizzato dal sistema di gestione. Per tale ragione è necessario descrivere accuratamente il comportamento dei dispositivi che si ha intenzione di gestire onde poter determinare istante per istante il loro stato.

Nel caso più semplice lo scaldacqua è un sistema composto da un serbatoio metallico coibentato, con all'interno una resistenza elettrica per il riscaldamento dell'acqua; inoltre sono presenti i tubi per l'ingresso dell'acqua fredda e per l'uscita dell'acqua calda.

Per descrivere il comportamento dello scaldacqua elettrico si è scelto un modello del primo ordine [**Paull:article**], [**Dolan:article**] che, per fornire l'andamento nel tempo della temperatura dell'acqua all'interno dello scaldacqua, tiene conto della dispersione termica attraverso le pareti del dispositivo, del raffreddamento

apportato dall'acqua fredda in ingresso oltre che dal riscaldamento generato dalla resistenza elettrica dello scaldacqua stesso.

Il modello matematico semplificato, a parametri concentrati, che descrive il comportamento dello scaldacqua è il seguente:

$$C \cdot \dot{T}_h(t) = -G \cdot [T_h(t) - T_{out}] - B(t) \cdot [T_h(t) - T_{in}] + Q(t) \quad (2.1)$$

in cui:

- T_h [°C] è la temperatura dell'acqua all'interno dello scaldacqua;
- $C = volume \cdot D \cdot C_p$ [J/°C] in cui
 - volume[L] è la quantità massima d'acqua contenuta nello scaldacqua
 - D è la densità dell'acqua, pari ad 1[Kg/L]
 - C_p è il calore specifico dell'acqua, pari a 4186 [J/Kg °C]
- $G = SA/R$ [W/°C] in cui
 - SA è la superficie dello scaldacqua[m²]
 - R [m² °C/W] è la resistenza termica dell'isolante solitamente utilizzato, data da d/λ dove d è lo spessore del materiale isolante e λ la sua conducibilità termica che per il polistirolo espanso è circa 0.03[W/m² °C] e considerando uno spessore di 3 cm porta grossomodo a R =1 [m² °C/W].
- $B(t) = D \cdot Wd(t) \cdot C_p$ [W/°C] in cui
 - Wd [L/s] è la portata dell'acqua in ingresso o uscita dal dispositivo
- T_{in} [°C] è la temperatura dell'acqua fredda in ingresso al dispositivo
- T_{out} [°C] è la temperatura ambiente
- Q(t) [W] è la potenza della resistenza dello scaldacqua.

In questo modello la variabile di stato è la temperatura T_h , che è anche la variabile di uscita, mentre gli ingressi sono le variabili $Q(t)$ e $B(t)$. La temperatura $T_h(t)$ diminuirà nel tempo a causa della dispersione termica ma soprattutto e molto più rapidamente a causa dell'ingresso dell'acqua fredda; tenderà invece ad aumentare a causa dell'attivarsi dell'elemento riscaldante. Quest'ultimo evento può essere determinato o dal fatto che la temperatura T_h passa al di sotto di una soglia minima (T_{min}) o da un reinserimento forzato dal sistema di DSM. Viceversa, il disinserirsi della resistenza elettrica può essere determinato o dal fatto che la temperatura supera una certa soglia massima (T_{max}) o ancora una volta, dal sistema di DSM.

Per la soluzione dell'equazione differenziale occorre assegnare il valore iniziale della temperatura $T_h(t)$ e conseguentemente di $Q(t)$; esso viene assegnato in maniera casuale, restando però compreso tra T_{max} e T_{min} [Hashem_Nehrir:article]. Ciò comporterà un anomalo picco di consumo nei primi passi della simulazione [Hashem_Nehrir:article] che tuttavia non influenza significativamente i risultati e volendo può essere risolto con una durata della simulazione stessa di più giorni anziché di uno solo [Hashem_Nehrir:article].

Un tipico andamento della temperatura nell'arco delle 24 ore può essere come quello rappresentato in figura 2.1, in cui si vede come la temperatura si abbassa lentamente, per effetto della dispersione termica attraverso le pareti, quando non c'è prelievo d'acqua ($W_d=0$) e più rapidamente nei tratti caratterizzati da $W_d>0$; le temperature T_{max} e T_{min} sono impostate a 60°C e 40°C rispettivamente, con conseguente attivazione e disattivazione dell'alimentazione della resistenza riscaldante.

2.1 Modellazione del consumo idrico

Da diverse attività di ricerca precedenti [Paull:article], [Dolan:article], [Lane:article] emerge che per determinare e simulare il profilo dei consumi energetici degli scaldacqua elettrici, conviene partire da un modello di consumi dell'acqua calda, relativo alle abitudini domestiche.

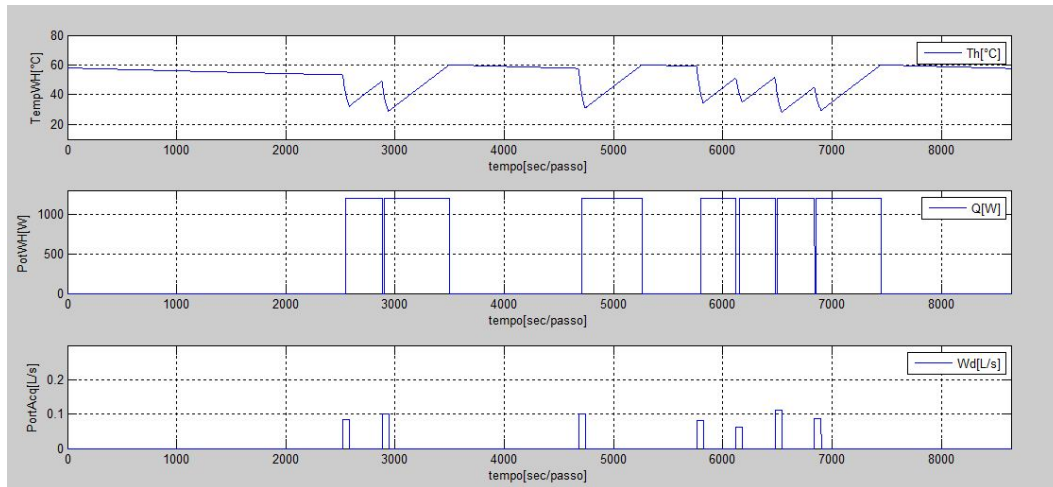


Figura 2.1: Esempio di una realizzazione relativa agli andamenti della temperatura dell'acqua all'interno dello scaldacqua Th , dell'inserimento e disinserimento dello scaldacqua Q e del consumo d'acqua Wd

Tale profilo si potrebbe determinare con una campagna di misure sul campo [Lane:article], attività che però potrebbe risultare onerosa.

In alternativa (ed è questa la strada seguita in questa tesi) si può ipotizzare una curva di consumi d'acqua calda e da essa ricavare una curva dei consumi degli scaldacqua; disponendo poi di una curva di consumi elettrici totali, si può ricavare per sottrazione una curva di consumi base, cioè relativa a tutti gli altri consumi domestici non derivanti dagli scaldacqua. Sommando tale profilo di consumi base, mantenuto fisso per le varie realizzazioni, con il profilo stocastico dei consumi degli scaldacqua si ottiene una curva relativa ai consumi totali stocastici; in base a tale curva si determina il riferimento per la produzione di energia.

Se tale riferimento si dovesse discostare troppo dalle varie realizzazioni dei consumi totali si può modificare il riferimento stesso, anziché ripartire dal riferimento dei consumi dell'acqua.

L'equazione che fornisce, istante per istante, la portata d'acqua calda che viene consumata è la seguente:

$$Wd(t) = \text{fattore} \cdot Pq \cdot \text{uso_calda} \cdot \text{fattore_miscelazione};$$

Per modellare l'utilizzo dell'acqua calda in una abitazione si è scelto di par-

tire dalla determinazione di un fattore che stabilisce se, in un certo istante è in corso l'erogazione dell'acqua calda o meno (fattore=1 o fattore=0, rispettivamente). Ipotizzando una curva realistica di consumi medi d'acqua calda si genera un numero casuale: se tale numero, all'istante considerato è inferiore al valore nella curva nell'istante corrispondente, allora il fattore varrà uno, altrimenti è posto a zero.

Moltiplicare tale fattore per la portata massima (P_q) di un miscelatore domestico significa consumare P_q [L/s] o zero [L/s]; tale situazione non è realistica, quindi con un altro numero casuale (nel codice indicato con `uso_calda`) si modella il fatto che l'apertura del miscelatore può assumere valori intermedi tra 0% e 100%. Inoltre si fissa ad un certo valore (fattore_miscelazione) la miscelazione[Nehrir:article] tra acqua calda e fredda.

Il volume in litri di ogni scaldacqua è fissato, quindi nota la portata, si può calcolare il tempo (`durata_max`) che impiegherà a terminare, l'acqua calda disponibile. La portata W_d durante l'arco delle 24 ore, sarà inoltre influenzata da quante persone usufruiscono della suddetta disponibilità.

2.2 Componenti nucleo familiare

Nel sito del Comune di Cagliari [`comune.cagliari.it:Cagliari`], Comune a cui sono riferiti i dati disponibili, sono presenti delle statistiche tratte dal Censimento sulla popolazione effettuato nel 2011; da tale sito si può dunque ricavare la tabella 2.1 che mostra da quanti componenti è statisticamente composto ogni nucleo familiare e quindi ogni utenza.

Ora è possibile determinare stocasticamente quanti utenti sono associabili ad ogni utenza idrica o elettrica:

si costruisce la curva cumulata relativa alla tabella 2.1, ovvero un vettore il cui primo elemento vale 36.87, il secondo (36.87+27.38), il terzo (36.87+27.38+18.95) etc come mostra la tabella 2.2;

Se una variabile casuale (compresa tra zero e cento) assume un valore inferiore

Tabella 2.1: Composizione nuclei familiari

Percentuale [%]	Numero componenti nucleo familiare(utenza)	
36.87	1	uno
27.38	2	due
18.95	3	tre
12.50	4	quattro
03.13	5	cinque
00.79	6	sei
00.38	7	sette o più

Tabella 2.2: Composizione nuclei familiari

Percentuale [%]	Numero componenti nucleo familiare(utenza)	
36.87	1	uno
64.25	2	uno o due
83.20	3	uno o due o tre
95.70	4	uno o due o tre o quattro
98.83	5	uno o due o tre o quattro o cinque
99.62	6	uno o due o tre o quattro o cinque o sei
100.0	7	uno o due o tre o quattro o cinque o sei o sette o più

ad un punto della curva cumulata, allora il numero di componenti del nucleo familiare sarà pari al più piccolo elemento del vettore che rispetta quella condizione.

Ad esempio se il numero casuale è pari a 50.12, il numero di componenti del nucleo familiare sarà pari a 2 in quanto è $50.12 < 64.25$ e 64.25 è il più piccolo fra i valori superiori a 50.12.

A partire da tale dato si può fissare sia il tipo di scaldacqua di cui disporrà verosimilmente ogni nucleo familiare (Tipo1 da 50[L] e superficie $1.1[m^2]$ o Tipo2 da 80[L] e superficie $1.4[m^2]$) sia il consumo d'acqua calda che sarà verosimilmente maggiore nel caso di nuclei familiari più numerosi.

Capitolo 3

Descrizione del simulatore

In questo capitolo viene descritto il sistema che simula il comportamento degli scaldacqua, il metodo di integrazione dell'equazione differenziale e come si ottengono le curve dei consumi stocastici a partire dai dati disponibili sui consumi totali.

Il simulatore si riferisce ad un campione di 1673 utenze. Per ognuna di esse calcola, come descritto precedentemente, il numero di utenti relativi all'utenza considerata e il relativo tipo di scaldacqua; a partire da tali dati simula istante per istante, il consumo d'acqua calda.

Conoscere l'andamento della temperatura dell'acqua all'interno degli scaldacqua è di fondamentale importanza per il controllo degli stessi. Ad esempio è necessario non far salire eccessivamente la temperatura in modo da evitare eventuali danni sia allo scaldacqua stesso che all'utente [**Nehrir:article**] che utilizza l'acqua calda; serve inoltre per garantire un servizio accettabile da parte dell'utente: se la temperatura dell'acqua calda fosse troppo bassa il suo utilizzo risulterebbe sgradevole. Tenere la temperatura al di sopra di una certa soglia minima consente anche di evitare la formazione di batteri [**Lacroix:article**], problema particolarmente critico in alcuni ambienti (ad esempio negli ospedali).

In base al vettore relativo alla portata d'acqua calda utilizzata dall'utente, si determina l'andamento della temperatura dell'acqua in ogni scaldacqua, nell'arco delle 24 ore. Tale andamento determinerà il carico elettrico degli scaldacqua stessi

e sarà determinato a sua volta dal loro attivarsi e il disattivarsi. Infatti, se la temperatura dell'acqua all'interno dello scaldacqua scende al di sotto di un limite minimo (T_{min}), sia a seguito di un consumo d'acqua che a seguito di perdite termiche, lo scaldacqua si inserirà, per disinserirsi poi quando la temperatura andrà oltre un limite massimo (T_{max}).

Del resto, quando lo scaldacqua si attiva fa aumentare la temperatura dell'acqua, mentre quando si disattiva lascia che la temperatura si abbassi. L'inserimento e il disinserimento possono essere anche forzati dal sistema di controllo, come descritto in seguito.

Nella figura 3.1 si chiarisce il concetto tramite una macchina a stati.

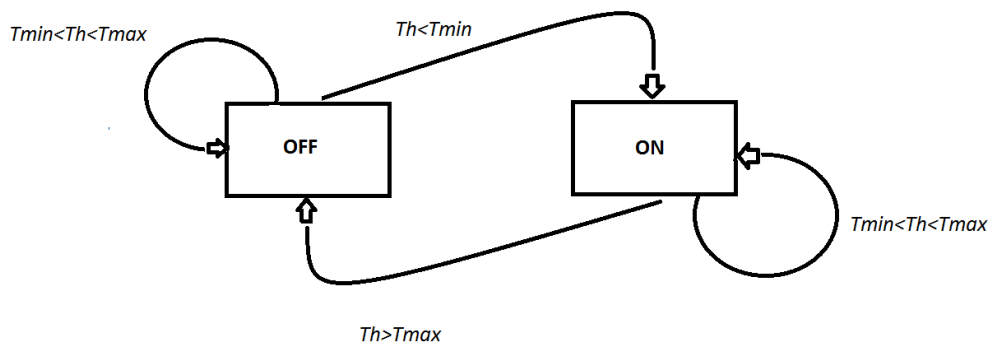


Figura 3.1: Rappresentazione tramite macchina a stati del funzionamento dello scaldacqua. T_h è la temperatura dell'acqua all'interno dello scaldacqua, T_{max} e T_{min} sono le soglie di temperatura.

Lo stesso concetto viene illustrato con un grafico, nella figura 3.2.

Il simulatore calcola la temperatura $T_h(t)$ e il consumo $Q(t)$ di ognuno dei 1673 scaldacqua risolvendo l'equazione differenziale 2.1 con un metodo RungeKutta del quarto ordine [vedi appendice: Integrazione numerica [mat.unimi.it:antonio]]. Con metodi di integrazione più semplici come ad esempio quello di Eulero, non si riesce ad ottenere gli andamenti reali delle temperature, in particolare negli istanti di cambio di stato dello scaldacqua.

Utilizzare e risolvere l'equazione differenziale in luogo della sua soluzione[Paull:article

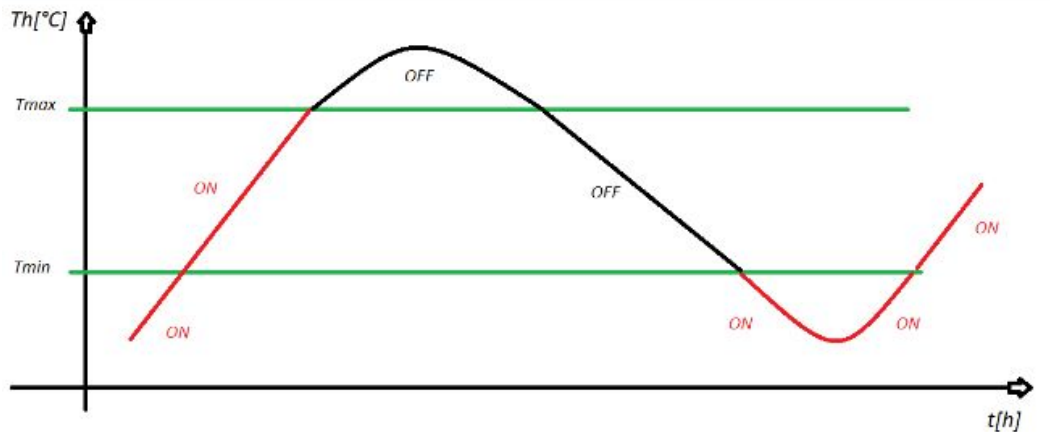


Figura 3.2: Rappresentazione grafica dell'andamento della temperatura (T_h) dell'acqua e dello stato dello scaldacqua, ON nei tratti in rosso e OFF nei tratti in nero.

], [Dolan:article] consente un più flessibile ed eventuale utilizzo futuro di tale simulatore.

Il passo di integrazione è selezionabile ma non può essere troppo alto. Il valore utilizzato nelle varie simulazioni è pari a trenta secondi. Un valore più basso non migliora significativamente la precisione dei risultati e aumenta i tempi del simulatore, mentre un valore più alto comporta errori nella determinazione degli andamenti delle varie grandezze.

Nel calcolo dei passi intermedi del metodo RungeKutta si è introdotta una semplificazione: si considera il valore dell'assorbimento elettrico dello scaldacqua costante. A rigore tale semplificazione produce un errore tutte le volte che avviene il cambio di stato dello scaldacqua (da ON a OFF o viceversa); il metodo di integrazione scelto si è dimostrato tale da non essere influenzato significativamente da tale semplificazione, come si nota anche dai grafici (figura 2.1) che riportano l'andamento della temperatura $T_h(t)$ e del consumo degli scaldacqua $Q(t)$.

Per calcolare l'andamento di $T_h(t)$ e $Q(t)$ occorre impostare le temperature iniziali dell'acqua negli scaldacqua, che vengono fissate ad un valore casuale compreso tra T_{max} e T_{in} . Serve inoltre impostare il tipo di scaldacqua e calcolare il vettore dei consumi idrici $B(t) = D \cdot Wd(t) \cdot Cp$. Tali valori, nel codice Matlab, vengono

passati dalla funzione relativa al calcolo del vettore W_d , alla funzione che calcola l'andamento della temperatura e dello stato dello scaldacqua. Inoltre occorre impostare la temperatura ambiente (T_{out}) che serve al simulatore per calcolare le perdite di calore attraverso le pareti dello scaldacqua: essa viene impostata pari alla temperatura media del giorno considerato (giorno di cui è disponibile il dato sui consumi totali fornito da Enel, 07/11/2013) in quanto tale semplificazione non comporta errori significativi.

Stesso discorso per la temperatura (T_{in}) dell'acqua fredda in ingresso allo scaldacqua; in base al decreto legge ddl n° 31 del 2/2/2001 essa deve essere compresa tra 12°C e 25°C; pertanto viene impostata ad un valore costante pari a 18°C.

A questo punto occorre introdurre il programma di DSM in quanto il simulatore per fornire l'andamento del carico degli scaldacqua ha la necessità di conoscere, non solo l'andamento delle temperature e il conseguente valore di $Q(t)$ degli scaldacqua ma anche come tale valore venga forzato dal programma di DSM.

Tale programma nasce a partire dal rilievo istante per istante dell'errore, inteso come scostamento della curva dei consumi rispetto alla ipotesi della produzione; ovvero ciò che si avrebbe se non si applicasse nessuna azione di controllo.

3.1 Consumi

Per determinare il carico della rete relativo alle suddette 1673 utenze, occorre dividerlo in due parti: una relativa ai soli scaldacqua elettrici, che è quella su cui agirà il programma di DSM; l'altra relativa a tutti gli altri carichi domestici.

Si dispone di una realizzazione relativa a 1673 utenze domestiche, fornita da ENEL Distribuzione (vedi figura 3.3) che rappresenta l'andamento della potenza attiva puntuale totale in una linea di media tensione (15kV) durante l'arco delle 24 ore, relativa al giorno 07/11/2013.

Da essa si sottrae una realizzazione dei consumi dei soli scaldacqua in modo da determinare un vettore che rappresenta i consumi di tutti gli altri carichi domestici; tale vettore rimarrà invariato per tutte le successive simulazioni.



Distribuzione

TMESX

Data di Stampa: 12/11/2013 18:18

1. Potenza attiva-Puntuale CP 150 15 kV LMT di Cagliari

Dal 07/11/2013 00:00 gio A 07/11/2013 23:50 gio

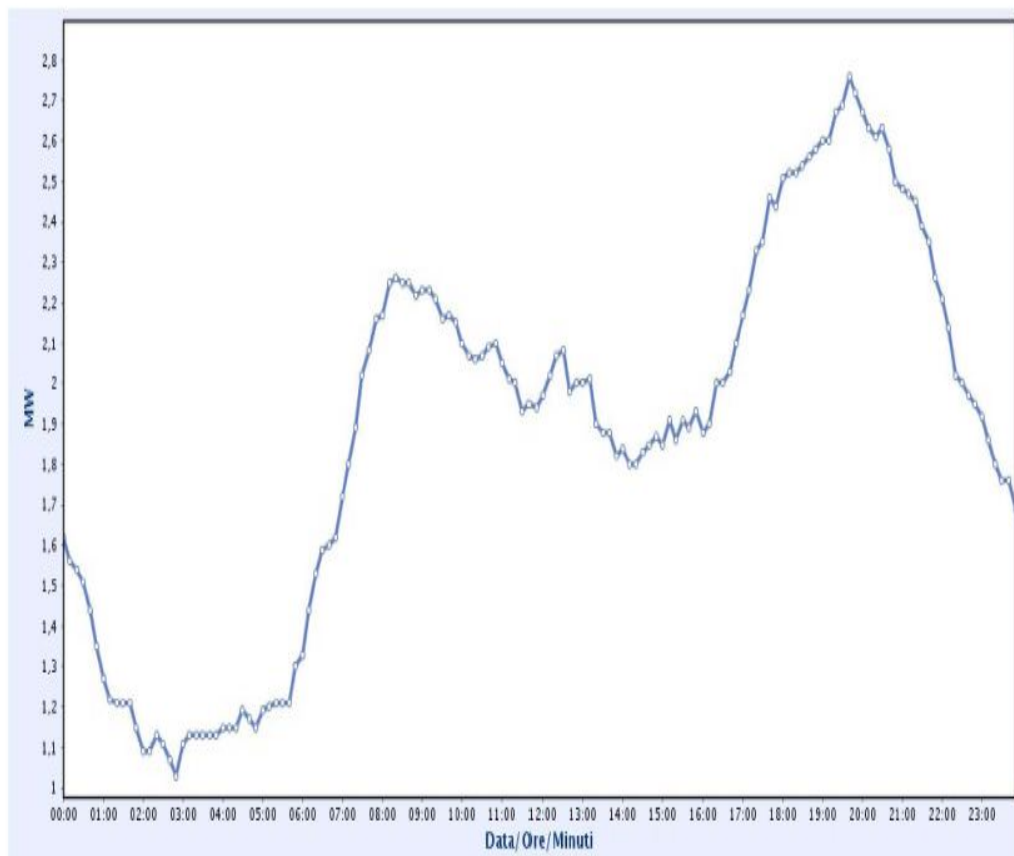


Figura 3.3: Rappresentazione grafica dell'andamento della potenza attiva istantanea misurata in una zona del Comune di Cagliari.

Il vettore dei consumi totali stocastici si otterrà come somma del vettore dei consumi base precedentemente ottenuto, più il vettore dei consumi stocastici relativo ai soli scaldacqua ottenuto dal simulatore.

Capitolo 4

Controllo di reti di scaldacqua per l'ottimizzazione energetica

In questo capitolo si descrive il funzionamento del sistema di controllo, i suoi obiettivi, la modifica che introduce nel comportamento degli scaldacqua; inoltre si descrivono alcuni problemi derivanti dalla presenza del sistema di controllo stesso e alcune loro soluzioni.

Il controllo del sistema parte dalla determinazione dell'errore (vedi figura 4.1); esso si ottiene istante per istante sottraendo dal valore del carico totale il valore del riferimento di produzione ipotizzato: tale errore sarà dunque positivo in caso di eccesso di consumi rispetto alla produzione stabilita, negativo altrimenti. Il valore ottenuto, diviso la potenza della resistenza dello scaldacqua, fornisce il numero delle utenze che devono essere inserite o disinserite in quell'istante in maniera forzata dal sistema di controllo, dunque in contrasto con la loro evoluzione non forzata (rappresentata nella figura 2.1);

In questo modo, si determina una matrice con tante righe quante sono le utenze (1673) e tante colonne quanti sono gli istanti di tempo che compongono le 24 ore. Ogni suo elemento può valere zero o uno o due:

- se vale zero vuol dire che all'istante e all'utenza corrispondente verrà disalimentato lo scaldacqua, secondo il programma di DSM.

- se vale uno lo scaldacqua rimarrà alimentato, secondo il programma di DSM.
- se vale due lo scaldacqua evolverà senza controllo forzato dal DSM, ma solo in base al suo termostato.

Ad ogni istante viene calcolato un vettore di elementi ON/OFF che verrà inviato agli scaldacqua, per far corrispondere il profilo dell'energia consumata con il riferimento di quella prodotta. Gli scaldacqua sono ipotizzati in grado di poter essere inseriti o disinseriti in maniera controllata. Ci si attende una riduzione dell'area dell'errore durante le varie realizzazioni, rispetto all'area che si otterrebbe in assenza di gestione del carico.

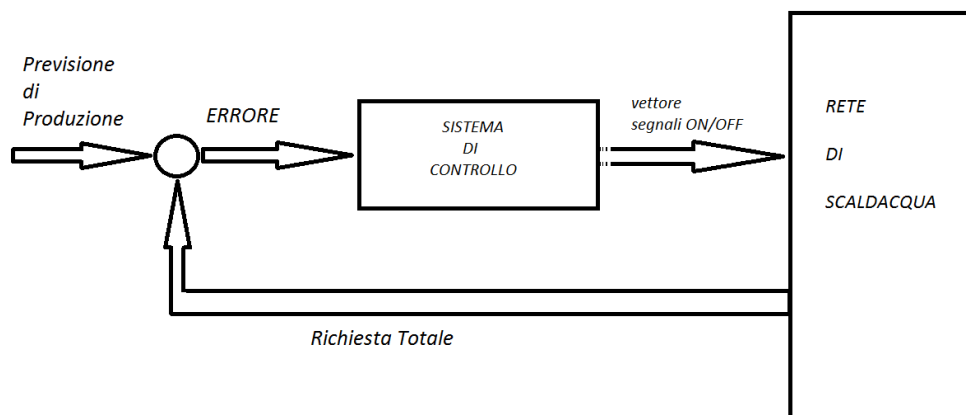


Figura 4.1: Rappresentazione tramite schema a blocchi del sistema di controllo.

L'applicazione della politica di DSM, ovvero l'utilizzo della matrice suddetta, si pone anche due ulteriori obiettivi:

1. Evitare un continuo inserimento e disinserimento dello stesso scaldacqua.
2. Far accumulare più energia agli scaldacqua in caso di eccesso di produzione

Per limitare il disagio all'utenza si impone di non disinserire lo scaldacqua se la temperatura dell'acqua calda scende sotto una soglia minima (T_{min}) che si può impostare a priori. Tale condizione verrà comunque violata dall'utente a seguito di un forte e prolungato consumo d'acqua calda. Si evita il chattering (

ovvero un passaggio di stato ON OFF / OFF ON con frequenza eccessiva) perchè tale situazione potrebbe danneggiare lo scaldacqua. Inoltre si impone in caso di eccesso di produzione un inserimento forzato dello scaldacqua (vedi figura 6), se $T_{min} < T_h < T_{max}$ atto a far accumulare più energia finchè la temperatura non raggiunge una soglia massima (T_{max}).

Per determinare i singoli elementi della matrice ON/OFF si parte, come detto, dal vettore errore che darà origine ad un numero di scaldacqua da disinserire o inserire se il profilo dei consumi supera l'energia disponibile o viceversa. La matrice conterrà colonna per colonna (ovvero istante per istante) tanti elementi pari a zero quanti sono gli scaldacqua da disinserire e tanti elementi pari ad uno quanti sono quelli da inserire.

A seguito dell'applicazione della matrice di controllo l'andamento della temperatura evolverà in maniera diversa, ovvero in funzione non solo delle soglie T_{max} e T_{min} ma anche dell'errore. Il nuovo comportamento del sistema è rappresentato nelle figure 4.2 e 4.3 in cui T_h è la temperatura dell'acqua all'interno dello scaldacqua, T_{max} e T_{min} sono le soglie di temperatura, Riferimento_Produzione è l'ipotesi dell'energia prodotta e Richiesta è l'energia totale consumata.

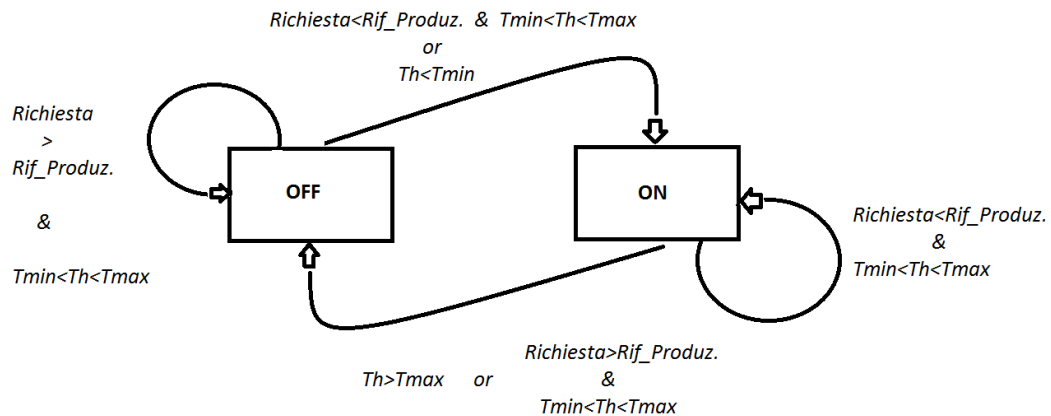


Figura 4.2: Rappresentazione tramite macchina a stati della gestione degli scaldacqua.

In altri termini, se il riferimento dell'energia prodotta va oltre la richiesta di energia la temperatura dell'acqua oscillerà intorno a T_{max} , in caso contrario la

temperatura oscillerà intorno a T_{min} ; il tutto per un tempo (selezionabile nel sistema) tale da non causare eccessivo disagio all'utente.

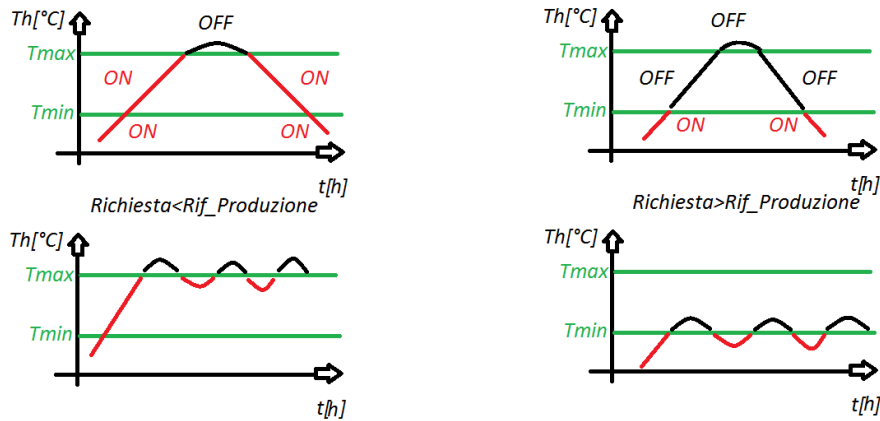


Figura 4.3: Rappresentazione grafica dell'andamento della temperatura nei periodi di gestione del carico

Bisogna evitare il chattering, ovvero passaggi di stato (ON OFF, OFF ON) degli scaldacqua con una frequenza eccessiva, quando la temperatura raggiunge valori prossimi a T_{max} o T_{min} . Ad esempio, se il sistema è in una situazione di carico inferiore al riferimento di produzione, tenderà a far oscillare la temperatura intorno a T_{max} ma, contemporaneamente, eviterà di farla andare oltre T_{max} stessa come mostrato nella figura 4.4:

Si risolve il problema inserendo tramite il sistema di controllo stesso una soglia di isteresi, sia attorno alla T_{max} che attorno alla T_{min} , che provoca un netto diradamento fra i passaggi di stato ON/OFF, come mostrato in figura 4.5.

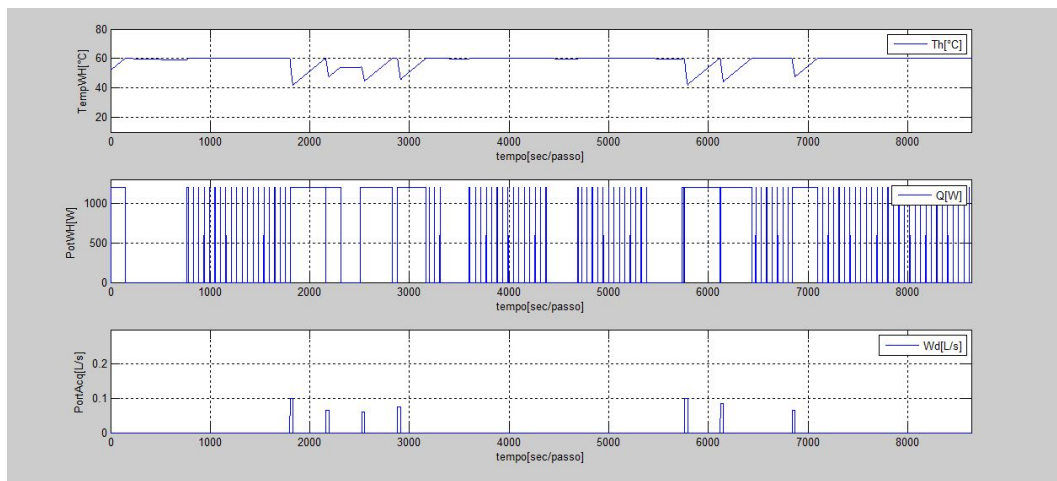


Figura 4.4: Esempio di oscillazione della temperatura intorno a T_{max}

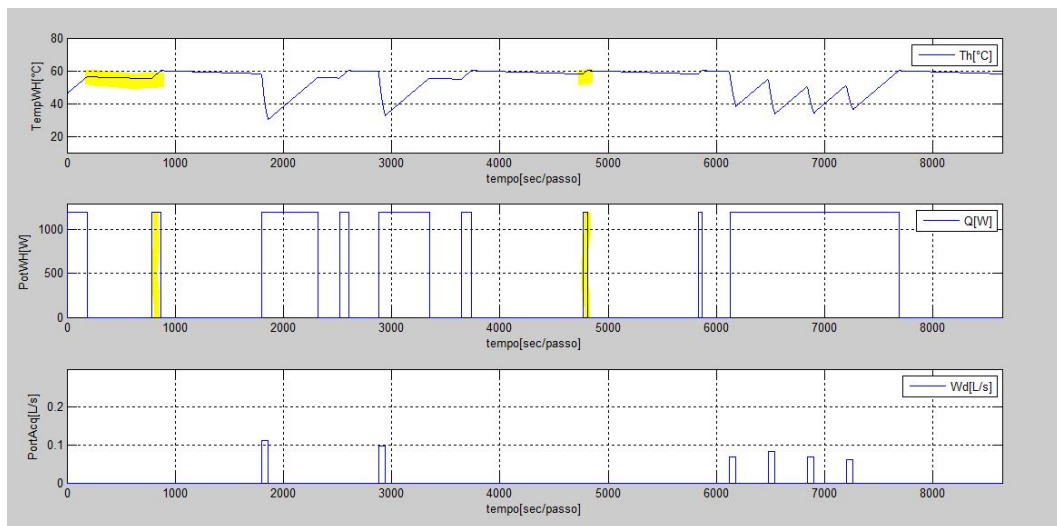


Figura 4.5: Nei tratti evidenziati si nota come si sia risolto il problema

Capitolo 5

Simulazione del sistema e risultati

In questo capitolo si descrivono i risultati ottenuti nei casi presi in esame; si accenna ai principali vantaggi economici e tecnici derivanti dall'applicazione del DSM proposto e si dà una indicazione quantitativa della correzione dell'errore che si può ottenere.

Per avere un riferimento sul comportamento del sistema, si può inizialmente considerare la possibilità di gestire sempre gli scaldacqua, cioè anche se non è rispettato il vincolo sulla temperatura ($T_{\min} < T_h < T_{\max}$). Quindi, in ogni istante, c'è un certo numero di scaldacqua che possono essere inseriti o disinseriti; essi possono essere gestiti dal sistema per correggere l'errore. Se la potenza ad essi associata è maggiore dell'errore, il sistema può portare l'errore stesso ad un valore nullo. Tale situazione è evidenziata nella figura 5.1, in cui è stato aggiunto un valore costante alla curva di produzione per evidenziare le due curve che altrimenti risulterebbero esattamente sovrapposte.

Si può valutare cosa accadrebbe se il numero di scaldacqua disponibili alla gestione fosse insufficiente ad azzerare l'errore; tale situazione si potrebbe verificare, ad esempio, nel caso in cui non tutte le utenze siano coinvolte dal programma di gestione. Per simulare questa situazione, ovvero il caso in cui il carico gestibile sia percentualmente inferiore a quello totale rispetto al caso della figura 5.1, alla curva dei consumi base della stessa figura, si è sommata una costante, pari a 0.75 [MW]. Dal grafico di figura 5.2 si vede che, laddove la curva dei consumi totali

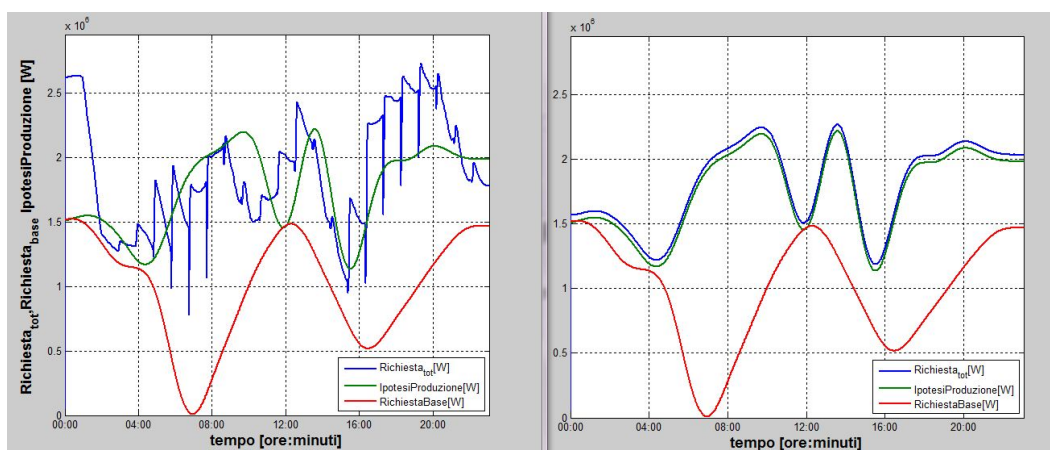


Figura 5.1: Curva di carico coincidente con la curva di produzione

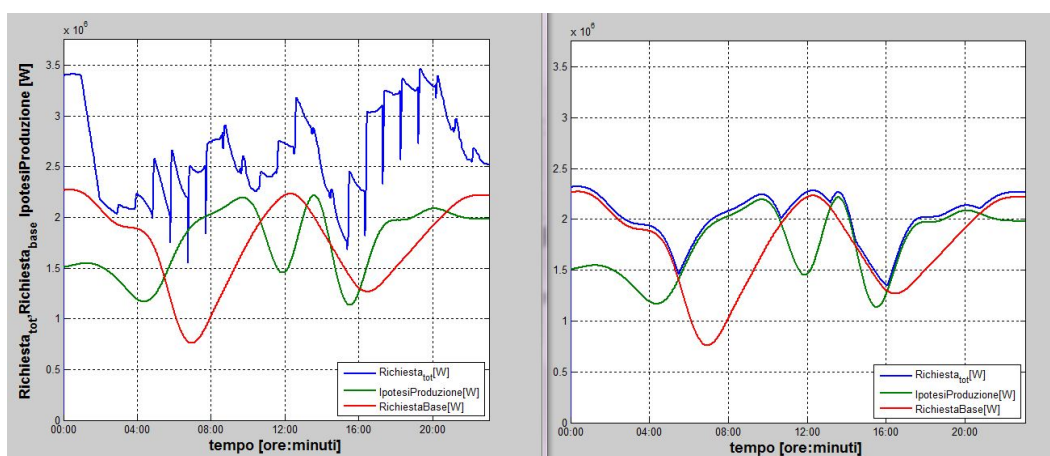


Figura 5.2: Curva di carico non sempre coincidente con la curva di produzione

è prossima al riferimento di produzione, l'errore si azzerava, mentre ciò non accade laddove il divario fra le due curve è eccessivo; in quest'ultimo caso la curva dei consumi totali coincide con quella dei consumi base che non può essere modulata dal sistema.

Se invece si impone il vincolo secondo cui $T_{min} < T_h < T_{max}$, il numero di scaldacqua gestibili per correggere l'errore si riduce; tale numero si riduce ulteriormente se si introduce anche una soglia di isteresi sulle soglie di temperatura T_{min} e T_{max} .

In figura 5.3 è rappresentato ciò che accade con una isteresi di due gradi; si vede

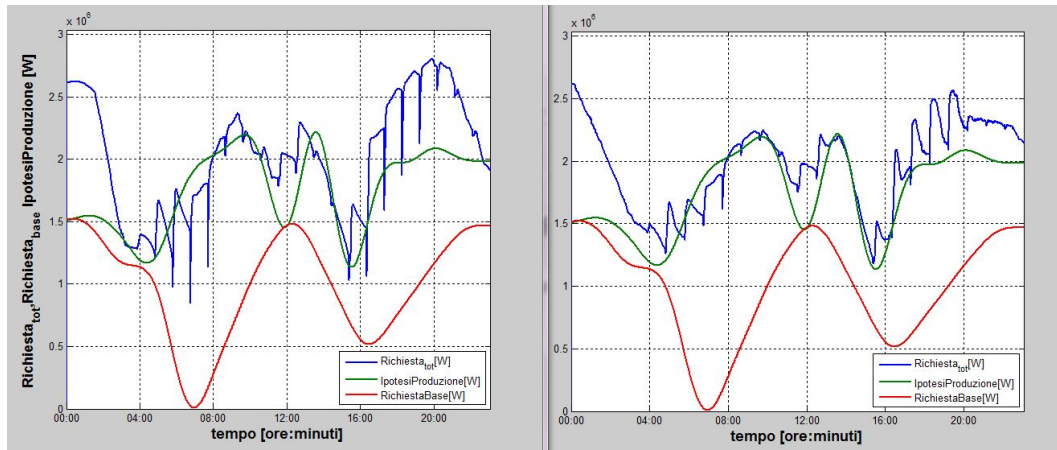


Figura 5.3: Curva di carico non sempre coincidente con la curva di produzione

come l'errore non riesce più ad annullarsi, neanche nel caso in cui non si aggiunga un riferimento costante alla curva dei consumi base.

Per fare una valutazione economica, seppure di massima, della utilità di tale gestione, occorre quantificare diversamente i vari periodi di eventuale riduzione dell'errore; essi sono infatti due, uno in cui c'è un eccesso di carico rispetto al riferimento di produzione ed uno in cui si verifica la situazione opposta.

Nei periodi in cui il carico risulta inferiore rispetto al riferimento di produzione, il sistema incrementa il carico stesso, forzando gli scaldacqua ad inserirsi per accumulare più energia. Tale azione consente al Fornitore di vendere quella energia non venduta nei momenti in cui è stata implementata l'azione di peak sheaving. Dalla quantità di energia spostata da un arco di tempo ad un altro e dalla differenza di costo (per la società di distribuzione) dell'energia da un periodo all'altro, si può ricavare una parte del vantaggio economico.

L'altra parte deriva dal fatto che il sistema di distribuzione dell'energia potrà utilizzare meno energia prodotta da centrali che la forniscono ad un costo elevato.

Il sistema si comporterà in maniera diversa a seconda di come si traccia il riferimento di produzione; prevarrà l'azione di valley filling se la curva di produzione sarà maggiore della curva di carico per più archi di tempo durante le 24 ore, in caso contrario prevarrà l'azione di peak sheaving. Le prestazioni del sistema dipendono

fortemente dal vincolo sulla temperatura e dalla soglia di isteresi introdotta.

In ogni caso dovrebbe sempre valere la condizione per cui l'energia fornita nell'arco delle 24 ore sia sempre maggiore o al più uguale a quella richiesta dalla rete e la previsione della produzione dovrà essere istante per istante sufficientemente prossima a quella dei consumi totali.

Per come è stata tracciata la curva dei consumi idrici, e tracciando una previsione di produzione approssimativamente uguale ad una realizzazione dei consumi totali, l'energia fornita per soddisfare i consumi base risulta circa il 50% della totale e l'errore si riduce circa del 30%; tale valore è indicativo di quanto il sistema può influire sui consumi totali nell'arco delle 24 ore ed è coerente col fatto che la potenza dello scaldacqua è circa un terzo della potenza massima solitamente disponibile per l'utente (3.5 kW).

Ci sarà una forte azione di peak sheaving nella situazione in cui si supponga che l'energia totale fornita durante le 24 ore non sia sufficiente a soddisfare tutto il fabbisogno energetico richiesto, cosa che potrebbe verificarsi ad esempio in occasione di eccezionali picchi di consumo o in occasione di guasti

[theguardian.com:[theguardian](http://theguardian.com)], [industryweek.com:[industryweek](http://industryweek.com)], [ea.govt.nz:governoNZ]: in entrambi i casi la priorità del ripristino dell'alimentazione elettrica è sicuramente superiore a quella della temperatura dell'acqua calda.

In questo caso il sistema si rivela molto utile; infatti si nota una riduzione dell'area dell'errore durante le 24 ore molto significativa e tanto maggiore quanto maggiore è la differenza tra energia richiesta e fornita. Tale sistema potrebbe essere anche più semplice da implementare, rispetto a quello che realizza anche la funzionalità di valley filling.

Capitolo 6

Conclusioni

In questa tesi è stato realizzato un programma che simula il comportamento di 1673 scaldacqua elettrici a partire da un dato medio di consumi d'acqua calda e consente di ricavarne il relativo carico per la rete elettrica.

Tale simulazione viene fatta sia in assenza di un sistema di controllo, sia in presenza di un sistema di DSM che consentirebbe, se implementato, di distribuire il carico degli scaldacqua nell'arco delle 24 ore in maniera più efficiente per il Fornitore. Dai risultati ottenuti si nota come il controllo applicato sia in grado di far seguire al carico il profilo di produzione preventivato, con un errore nettamente al di sotto di quello che si avrebbe senza il DSM.

Un ulteriore sviluppo possibile di questa tesi si basa sul fatto che il simulatore presentato è in grado di fornire istante per istante, sia lo stato del singolo scaldacqua (ON o OFF), sia la sua temperatura; pertanto, essendo nota la dinamica degli scaldacqua, si può calcolare quali e quanti di essi è opportuno inserire e disinserire, tenendo anche conto di ciò che tale azione comporterà nei momenti successivi all'istante considerato e non solo dell'effetto all'istante corrente. Tale miglioramento potrebbe portare al raggiungimento degli obiettivi del Fornitore con minori disagi per l'utente.

Si potrebbe anche valutare la formulazione di un indice di qualità da associare al tipo di DSM proposto, che tenga conto sia dei vantaggi per il Fornitore, sia degli

svantaggi per gli utenti; si è visto infatti dai risultati come tali esigenze siano fra loro contrastanti.

Capitolo 7

Appendici

7.1 Integrazione numerica

INTEGRAZIONE NUMERICA

In questa appendice discutiamo brevemente il problema dell'integrazione numerica delle equazioni differenziali. Dopo una breve esposizione del metodo di Eulero, interessante al fine di illustrare i concetti, ma di scarsa utilità per il calcolo effettivo, prenderemo in considerazione due metodi che si distinguono per la loro semplicità, e precisamente lo schema di Runge Kutta, valido in generale per sistemi di equazioni del primo ordine, e il cosiddetto algoritmo del leap-frog1 che costituisce l'esempio più semplice di algoritmo symplettico. Per semplicità, tratteremo il caso di equazioni in dimensione due. Per descrivere il metodo di Runge-Kutta faremo riferimento al caso di equazioni del primo ordine della forma

$$\dot{x} = f(x, t) \tag{7.1}$$

L'estensione al caso di sistemi di equazioni differenziali non presenta difficoltà sostanziali: basta sostanzialmente applicare le stesse formule alla componenti di un vettore. Per la discussione del metodo del leap-frog faremo riferimento diretto all'equazione di Newton

$$\ddot{x} = f(x, t), \quad (7.2)$$

che descrive un modello con forze indipendenti dalla velocità, estendendo poi brevemente la discussione al caso di equazioni in forma hamiltoniana. Va da sé che la trattazione non potrà che essere una prima introduzione: il lettore interessato all'argomento potrà trovare molto di più nei testi di analisi numerica.

1

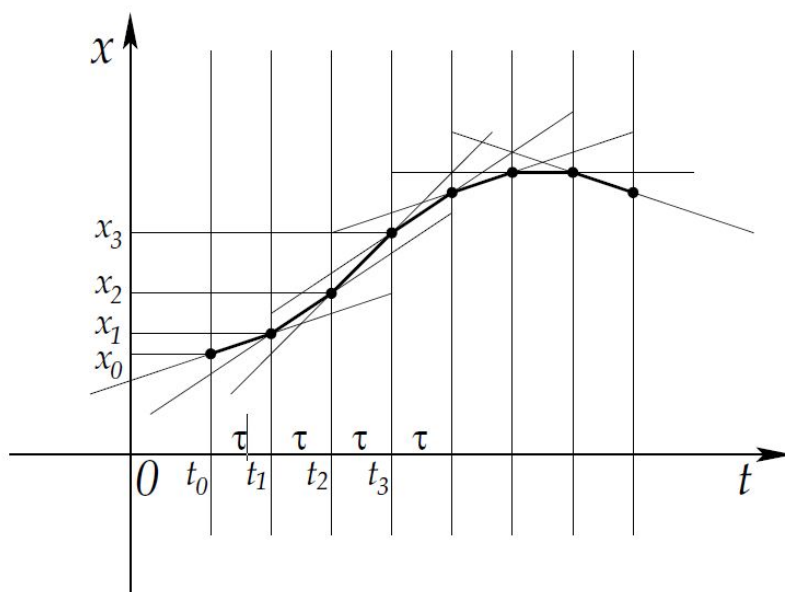


Figura 7.1: A1 Il metodo di integrazione di Eulero: si approssima la curva con dei tratti di tangente incrementando t a ciascun passo di una quantità fissata τ .

A.1 Il metodo di Eulero

Un primo metodo, attribuito ad Eulero, si fonda sull'osservazione che abbiamo già avuto occasione di fare: il secondo membro definisce in ogni punto $(t, x) \in \mathcal{D}$

¹ Il leap-frog è il gioco noto da noi come salto della cavallina. Una rapida occhiata allo schema di calcolo descritto più avanti rende ben ragione della scelta apparentemente bizzarra del nome. Il lettore osserverà che i metodi qui illustrati sono perfettamente applicabili anche ricorrendo al calcolo a mano, a patto di avere tempo sufficiente e pazienza pressochè illimitata. L'uso di una calcolatrice tascabile, meglio se programmabile, può essere molto istruttivo: la programmazione è tipicamente abbastanza semplice, e l'esecuzione lenta lascia tempo alla riflessione.

la tangente al grafico della soluzione $x(t)$. Il procedimento è illustrato in figura A.1. Vediamolo in dettaglio. Si fissa un passo di integrazione τ arbitrario, ragionevolmente piccolo. Scelto il punto iniziale (t_0, x_0) si approssima la soluzione a $t_1 = t_0 + \tau$ calcolando $x(t_1) = x(t_0) + \tau f(x_0, t_0)$. Avendo trovato il nuovo punto (t_1, x_1) si incrementa di nuovo t di τ , e si calcola $x(t_2) = x(t_1) + \tau f(x_1, t_1)$, e così via. Naturalmente, i punti calcolati sono solo approssimazioni della soluzione; quanto questo calcolo sia affidabile è faccenda tutta da discutere. In termini più precisi possiamo esporre il procedimento così:

1. si fissa il passo di integrazione τ ;
2. si sceglie il dato iniziale x_0, t_0 ;
3. si procede ricorsivamente calcolando

$$t_j = t_{j-1} + \tau, \quad x_j = x_{j-1} + \tau f(x_{j-1}, t_{j-1}), \quad j = 1, \dots \quad (7.3)$$

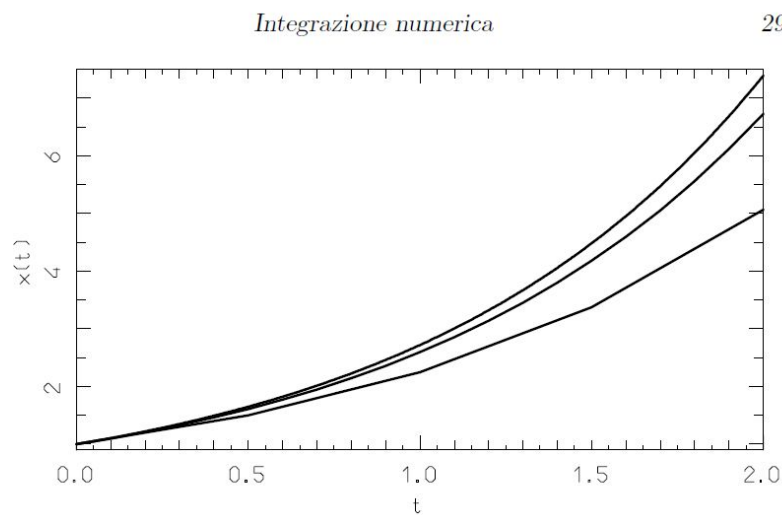


Figura 7.2: A2 Soluzione numerica dell'equazione $x' = x$ mediante il metodo di Eulero. Le curve rappresentano, a partire dal basso, i risultati ottenuti con passi di integrazione $\tau = 0.5$ e $\tau = 0.1$; la curva superiore è la soluzione corretta $x(t) = e^t$.

Si costruisce in tal modo una successione x_0, x_1, \dots, x_n che approssima la soluzione ai tempi t_0, t_1, \dots, t_n , o almeno così si spera che faccia. Se vogliamo valutare l'errore commesso nel corso di questo procedimento possiamo partire valutando l'errore locale che si commette ad ogni singolo passo. A tal fine facciamo uso della formula di Taylor $x(t+\tau) = x(t) + \tau\dot{x}(t) + O(\tau^2)$, dove con $O(\tau^2)$ si indica il resto. Naturalmente per usare questa formula dobbiamo supporre che $x(t)$ sia due volte differenziabile, il che, ricordando che $x=f(x,t)$, equivale a supporre che $f(x,t)$ sia di classe $C1$ rispetto ai suoi argomenti. Osserviamo però che la stima locale non da nessuna indicazione a priori su come l'errore si accumuli nel corso dell'integrazione. Proviamo a controllare la propagazione dell'errore ricorrendo al calcolo esplicito. A tal fine facciamo uso dell'equazione $\dot{x}=x$ con condizione iniziale $x(0)=1$. Ci aspettiamo così di calcolare una successione di punti che approssima la funzione $x(t) = e^t$. Il risultato è illustrato in figura A.2. La curva in alto è il grafico della funzione e^t . Le altre due curve rappresentano le soluzioni approssimate con passi di integrazione $\tau = 0.5$ (curva inferiore)

² Si osservi che è $\ddot{x} = \frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial f}{\partial t}$.

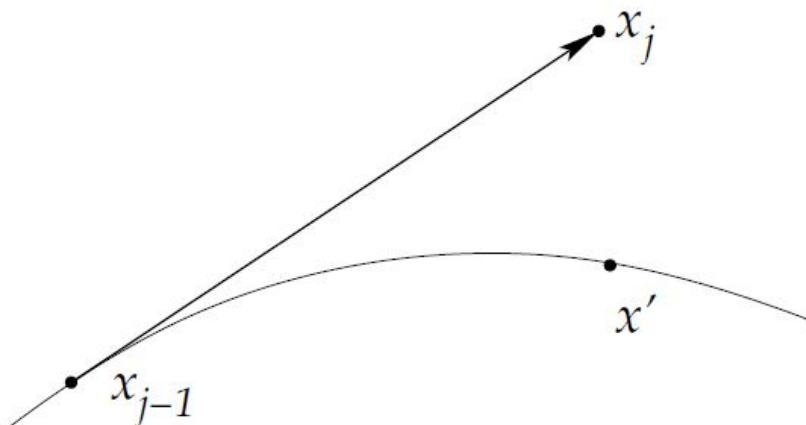


Figura 7.3: A3 Il singolo passo di integrazione col metodo di Eulero. Lo spostamento lungo la tangente tende ad allontanare sensibilmente il punto calcolato x_j dal punto dell'orbita vera x' .

² La forma di Lagrange del resto della formula di Taylor afferma che la quantità trascurata è $\frac{\tau^2}{2} \ddot{x}(t+\theta\tau)$ dove $0 < \theta < 1$. Qui ne facciamo uso semplicemente per stabilire che l'errore decresce almeno come τ^2 .

e $\tau = 0.1$ (curva intermedia). Si vede bene come le curve calcolate numericamente si allontanino sistematicamente dalla soluzione vera. La figura A.3 illustra la caratteristica di instabilità del metodo di Eulero: lo spostarsi lungo la tangente introduce un errore sistematico che tende ad accumularsi in modo perverso fin che la concavità della curva non muta.

A.2 I metodi di Runge–Kutta Si può cercare di migliorare l'approssimazione della soluzione tenendo conto di derivate successive, ad esempio utilizzando la formula di Taylor fino a termini del secondo ordine

$$x(t + \tau) = x(t) + \tau \dot{x}(t) + \frac{\tau^2}{2} \ddot{x} + O(\tau^3). \quad (7.4)$$

Ricordando che

$$\dot{x} = f(x, t), \ddot{x} = \frac{d}{dt}f(x, t) = \frac{\partial f}{\partial t} \dot{x} + \frac{\partial f}{\partial x} \dot{x} \quad (7.5)$$

si ricaverebbe lo schema di integrazione

$$t_j = t_{j-1} + \tau, \quad x_j = x_{j-1} + \tau f(x_{j-1}, t_{j-1}) + \frac{\tau^2}{2} \left(f \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial t} \right) \Big|_{x_{j-1}, t_{j-1}} \quad (7.6)$$

3

Naturalmente, il calcolo della derivata seconda può diventare disagiata, il che rende il metodo poco attraente. Può quindi essere interessante cercare formule che consentano di approssimare x facendo uso solo del calcolo della funzione $f(x, t)$. Si trova così una famiglia di schemi di integrazione nota col nome di metodi di Runge–Kutta. Illustriamo qui in dettaglio il più semplice di tali metodi. L'idea sottostante è calcolare il passo da $x(t)$ a $x(t + \tau)$ facendo uso della derivata in un punto intermedio. Ricaviamo anzitutto un paio di formule utili. Considera-

³ Si potrebbe concludere che il metodo di Eulero è del tutto inadatto al calcolo esplicito della soluzione di un'equazione differenziale. Ciò è certamente vero quando si voglia seguire un'orbita per un tempo lungo. Ma su intervalli di tempo piccoli – ovvero per il calcolo approssimato di funzioni nell'intorno di un punto noto – il metodo può ben essere utile. In effetti, i passi di integrazione utilizzati per tracciare la figura A.2 non sono propriamente piccoli. La scelta è stata dettata dal desiderio di rendere chiaramente visibile il fenomeno dell'instabilità.

mo una funzione generica $\varphi(t)$, che supporremo essere due volte differenziabile, e consideriamo le due formule di Taylor

$$\varphi(t + \tau) = \varphi(t + \frac{\tau}{2}) + \frac{\tau}{2}\dot{\varphi}(t + \frac{\tau}{2}) + \frac{\tau^2}{4 \cdot 2!}\ddot{\varphi}(t + \frac{\tau}{2}) + O(\tau^3) \quad (7.7)$$

$$\varphi(t) = \varphi(t + \frac{\tau}{2}) - \frac{\tau}{2}\dot{\varphi}(t + \frac{\tau}{2}) + \frac{\tau^2}{4 \cdot 2!}\ddot{\varphi}(t + \frac{\tau}{2}) + O(\tau^3) \quad (7.8)$$

Sottraendo membro a membro si ottiene

$$\varphi(t + \tau) - \varphi(t) = \tau\dot{\varphi}(t + \frac{\tau}{2}) + O(\tau^3) \quad (7.9)$$

Si osservi bene che l'errore non è dell'ordine di τ^2 , come ci si aspetterebbe da una formula in cui si fa uso della sola derivata prima, ma τ^3 . Ciò perchè nella somma si è cancellato il termine contenente $\ddot{\varphi}$. Sommando membro a membro si ottiene invece

$$\varphi(t + \frac{\tau}{2}) = \frac{\varphi(t) + \varphi(t + \tau)}{2} + O(\tau^2). \quad (7.10)$$

Anche qui, la cancellazione del termine in $\dot{\varphi}$ fa guadagnare un ordine in τ . Veniamo al primo metodo. Sostituendo $x(t)$ al posto di $\varphi(t)$ nella (A.3) e ricordando che stiamo risolvendo l'equazione $\dot{x} = f(x, t)$ otteniamo la formula del punto centrale

$$x(t + \tau) - x(t) = \tau f(x(t + \frac{\tau}{2}), t + \frac{\tau}{2}). \quad (7.11)$$

Non si tratta ancora di una formula utilizzabile, perchè vi compare il punto $x(t + \frac{\tau}{2})$, che non ci è noto. Possiamo però approssimare tale valore usando semplicemente il metodo di Eulero, ossia

$$x(t + \frac{\tau}{2}) = x(t) + \frac{\tau}{2}f(x(t), t) + O(\tau^2). \quad (7.12)$$

Ciò è conveniente, in quanto nel calcolo della derivata nel punto intermedio si ha

$$f(x(t + \frac{\tau}{2}), t + \frac{\tau}{2}) = f(x(t) + \tau f(x(t), t), t + \frac{\tau}{2}) + O(\tau^2), \quad (7.13)$$

Ricordando che nella (A.5) il valore della funzione f viene comunque moltiplicato per τ questa approssimazione introduce un errore di ordine τ^3 , non superiore a quello che già ci si attendeva. Si ottiene così un primo schema

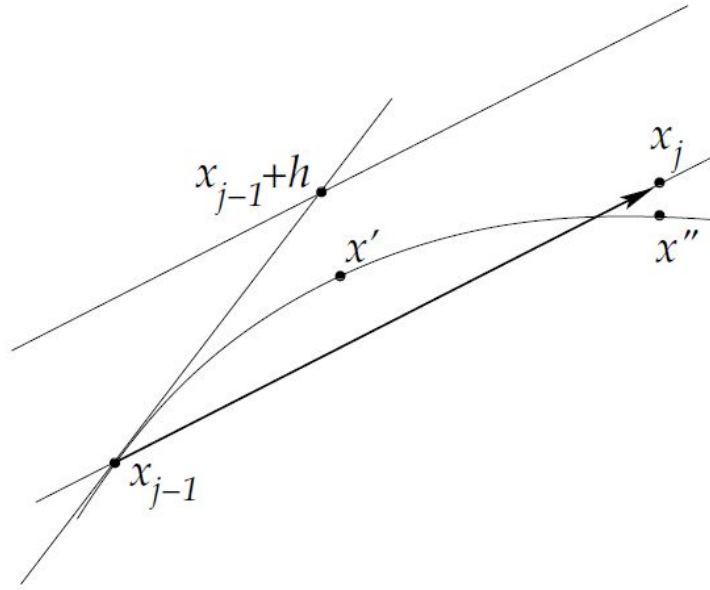


Figura 7.4: Il metodo di Runge–Kutta del secondo ordine della formula (A6). La tangente nel punto intermedio x' viene approssimata mediante la tangente nel punto $x_{j-1} + h$, calcolato mediante il metodo di Eulero. Questo riduce sensibilmente l'errore rispetto allo spostamento lungo la tangente calcolata nel punto x_{j-1}

di integrazione del tipo di Runge–Kutta del secondo ordine, con errore di ordine τ^3 , illustrato in figura A.4:

$$h = \frac{\tau}{2} f(x_{j-1}, t_{j-1}) \quad (7.14)$$

$$x_j = x_{j-1} + \tau f(x_{j-1} + h, t + \frac{\tau}{2}) \quad (7.15)$$

$$t_j = t_{j-1} + \tau. \quad (7.16)$$

Veniamo al secondo schema. Si applica ancora la formula del punto centrale (A.5), ma questa volta si cerca di approssimare la derivata nel punto intermedio $x(t + \tau/2)$ calcolando la media tra le derivate nei punti $x(t)$ e $x(t + \tau)$. La (A.4) assicura che l'errore è di ordine $O(\tau^2)$ in un termine che deve essere ancora moltiplicato per τ . A tal fine si cerca una prima approssimazione del punto $x(t + \tau)$ con il metodo di Eulero; si verifica facilmente, anche qui, che tale approssimazione introduce un errore di ordine τ^2 nel calcolo della derivata, da moltiplicarsi anch'esso per τ . Lo schema di integrazione diventa

$$h_1 = \tau f(x_{j-1}, t_{j-1}), \quad (7.17)$$

$$h_2 = \tau f(x_{j-1} + h_1, t_{j-1} + \tau) \quad (7.18)$$

$$x_j = x_{j-1} + \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (7.19)$$

$$t_j = t_{j-1} + \tau. \quad (7.20)$$

Esistono algoritmi di tipo Runge–Kutta che riducono ulteriormente l'errore sul singolo passo. La discussione dettagliata esula dagli scopi di queste note, ma può essere utile almeno riportare gli algoritmi del terzo ordine (con errore di ordine τ^4) e del quarto ordine (con errore di ordine τ^5). L'algoritmo del terzo ordine è

$$h_1 = \tau f(x_{j-1}, t_{j-1}), \quad (7.21)$$

$$h_2 = \tau f(x_{j-1} + \frac{h_1}{2}, t_{j-1} + \frac{\tau}{2}), \quad (7.22)$$

$$h_3 = \tau f(x_{j-1} + h_2, t_{j-1} + \tau), \quad (7.23)$$

$$x_j = x_{j-1} + \frac{h_1}{6} + \frac{2h_2}{3} + \frac{h_3}{6}, \quad (7.24)$$

$$t_j = t_{j-1} + \tau. \quad (7.25)$$

L'algoritmo del quarto ordine è

$$h_1 = \tau f(x_{j-1}, t_{j-1}), \quad (7.26)$$

$$h_2 = \tau f\left(x_{j-1} + \frac{h_1}{2}, t_{j-1} + \frac{\tau}{2}\right), \quad (7.27)$$

$$h_3 = \tau f\left(x_{j-1} + \frac{h_2}{2}, t_{j-1} + \frac{\tau}{2}\right), \quad (7.28)$$

$$h_4 = \tau f(x_{j-1} + h_3, t_{j-1} + \tau). \quad (7.29)$$

$$x_j = x_{j-1} + \frac{h_1}{6} + \frac{h_2}{3} + \frac{h_3}{3} + \frac{h_4}{6}. \quad (7.30)$$

$$t_j = t_{j-1} + \tau. \quad (7.31)$$

La lista dei metodi di integrazione numerica non si esaurisce certo qui: il lettore interessato potrà trovarne altri, più complessi ma spesso più efficaci, consultando dei testi di analisi numerica.

7.2 Codice

```
1  %in questa versione si considera il consumo totale e non solo dato dagli WH
   %considera l'uso della sola acqua calda
3  %calcola l'errore come richiesta_tot-riferimento_PRODUZIONE
   %si implementa il concetto secondo cui, se la Th scende sotto una certa
5  %soglia minima (Tmin) il sistema di controllo lascia comunque inserito
   %il WH e che se la Th e' sopra Tmax il sistema disinserisce il WH
7  % se l'errore e' < 0 per fargli accumulare piu' energia inserisce il WH se Tmin<Th<Tmax
   % se l'errore e' >0 disinserisce il WH se Tmin<Th<Tmax
9
   %QUESTA VERSIONE E' QUELLA IN GRADO DI AZZERARE L'ERRORE
11 clear all
   clc
13
   passo=30;      % epsilon, passo di integrazione
15  ss=1;          % un secondo
   mm=60*ss;      % un minuto m = 60 secondi s
17  hh=60*mm;     % un ora h = 60 minuti
   gg=24*hh;     % un giorno = 24 ore
19  t=1:gg/passo;% arco delle 24h diviso in passi
   Lung_t=length(t);
21
   % DATI WATER HEATER
23  %superficie[m^2] per 50[L],1.4[m^2] per 80[L],1200[W] per tutti
   SA=1.1;
25  volume=50;%[L] volume in litri
   Pot=1200; % [W]Potenza WH
27  R=1;          % [m^2 C/W]Resistenza termica del WH
   G=SA/R;      % [W/C]
29
   %IMPOSTAZIONE TERMOSTATO
31  Tmin=40; % [C] impostazione minima temperatura termostato
   IsteresiTmin=2;
33  Tmax=60; % [C] impostazione massima temperatura termostato
   IsteresiTmax=2;
35  Cp=4186 ; % [J/KgC] calore specifico dell'acqua
   D=1;        % [kg/L] densita dell'acqua
37
   C=volume*D*Cp;% [L][Kg/L][J/KgC]=[J/C]
39
   Tin=18; % [C]Temperatura acqua fredda in ingresso al WH [C]
41  Tout=20;% [C]Temperatura (ambiente), del giorno dei dati ENEL 20C
43  NUM_UTENZE=1673;% [#]Numero abitanti relativo ai dati di consumo ENEL: 1673
   fattore_misclazione=0.6;% [%]fattore misclazione calda-fredda
45  Pq=0.20;      % [L/s] portata media rubinetto domestico
47  NUM_SIMULAZIONI=2;
```

```

Wd_totale=zeros(1,Lung_t);%inizializzazione vettore consumo acqua
49 Q_totale =zeros(1,Lung_t);%inizializzazione vettore consumo energetico WH
N_WH_on =zeros(1,Lung_t);%inizializzazione vettore numero WH accesi
51 Th=zeros(NUM_UTENZE,1); %inizializz. vett. della temp.acqua interna al WH
Q =zeros(NUM_UTENZE,1); %inizializzazione vettore dell'energia fornita al WH
53 ERR=zeros(1,Lung_t); %inizializz. vettore ERRORE=RICHIESTA-RIF_PRODUZIONE
err=zeros(NUM_SIMULAZIONI,Lung_t);%iniz vettore errore
55 num_off=zeros(1,Lung_t); %inizializzazione vettore del numero di WH da spegnere
num_on =zeros(1,Lung_t); %inizializzazione vettore del numero di WH da accendere
57 richiesta_tot=zeros(1,Lung_t);
STACCHI=2*ones(NUM_UTENZE,Lung_t); %inizializzazione Matrice stacchi
59
rec_Q =zeros(NUM_UTENZE,Lung_t); %matrice Q per i vari utenti
61 rec_Th=zeros(NUM_UTENZE,Lung_t); %matrice temperature Th dei vari utenti
rec_Wd=zeros(NUM_UTENZE,Lung_t);
63 rec_B=zeros(NUM_UTENZE,Lung_t);

65 %assegnazione Th e Q iniziali
rec_Th(:,1)=rand(NUM_UTENZE,1)*(Tmax-Tin)+Tin;
67 idxT=find(rec_Th(:,1)<Tmin);
rec_Q(idxT(1:size(idxT)),1)=Pot;
69
%calcolaProd: calcola la RIF_PRODUZIONE di energia
71 %(relativa al soddisfacimento dei consumi totali)
%in funzione di dati di RIF_PRODUZIONE oraria, supposti noti a priori
73 RIF_PRODUZIONE=calcolaRiferimentoProduzione(hh,passo,Lung_t);

75 area_RIF_PROD=integra(RIF_PRODUZIONE,Lung_t,passo)

77 %calcolaRich: calcola la richiesta di energia totale in funzione dei dati ENEL
RICHIESTA=calcolaRich(hh,passo,Lung_t);
79
for utenze=1:NUM_UTENZE % per ogni utenza delle NUM_UTENZE
81
% calcolo dei valori C G num_comp secondo statistica censimento
83 [C,G,num_comp,durata_max]=calcolaCGN_C();

85 % calcolo Wd: consumo acqua calda istantaneo
[Wd,B]=calcolaWd(Pq,fattore_misceleazione,durata_max,num_comp,mm,hh,passo,Lung_t);
87 rec_Wd(utenze,:)=Wd;
rec_B(utenze,:)=B;
89 % calcolo del consumo d'acqua calda aggregato
Wd_totale=Wd_totale+Wd;
91 end

93 richiesta_base=calcolaRich_Base(hh,passo,Lung_t);
figure(20)
95 plot(t,richiesta_base,'linewidth',2),grid,legend('rich_b_a_s_e'),
xlabel('tempo [sec/pass]'),ylabel('richiesta_base [W]')
97

```

```

for j=1: NUM_SIMULAZIONI          %ciclo relativo al calcolo dell'errore
99
    conteggio=zeros(1,Lung_t);    %inizializzazione vettore conteggio WH staccati
101    Q_totale =zeros(1,Lung_t);  %inizializzazione vettore consumo energetico WH

103    for i=2:Lung_t

105        for utenze=1:NUM_UTENZE

107            %calcolo Th(temperatura acqua WH) e Q(stato WH, on/off), per ogni passo
                [Th,Q]=RK5_on_off(C,G,Tout,Tin,Tmax,Tmin,Pot,STACCHI(:,i-1),utenze,rec_B(utenze,i-1),passo,
109                rec_Th(utenze,i)=Th;
                rec_Q(utenze,i)=Q;

111            end

113                Q_totale(i)=sum(rec_Q(:,i));

115                richiesta_tot(i)=richiesta_base(i)+ Q_totale(i);

117            %calcolo l'errore ERR come energia richiesta totale meno energia fornita
119            ERR(i)=richiesta_tot(i)-RIF_PRODUZIONE(i);

121            %calcolo numero di WH da disinserire/inserire passo per passo
                [num_off(i),num_on(i)]=calcoloNumOffOn5(ERR(i),Pot);

123
            if j>1
125                if ERR(i)>0
                    % -- recupera gli indici degli WH attaccati
127                    idx=find(rec_Q(:,i)==Pot);
                    % -- stacca solo se
129                    idx=find(rec_Th(idx,i)>Tmin+IsteresiTmin);
                    % -- numero WH staccabili
131                    n = min(size(idx),num_off(i));
                    % -- stacca i WH
133                    rec_Q(idx(1:n),i)=0;
                else
135                    % -- recupera gli indici degli WH staccati
                    idx=find(rec_Q(:,i)==0);
137                    % -- reinserisce solo se
                    idx=find(rec_Th(idx,i)<Tmax-IsteresiTmax);
139                    % -- numero WH attaccabili
                    n = min(size(idx),num_on(i));
141                    % -- attacca i WH
                    rec_Q(idx(1:n),i)=Pot;
143                end
                % -- ricalcola la Q_totale
145                Q_totale(i)=sum(rec_Q(:,i));
                % -- ricalcola la richiesta totale
147                richiesta_tot(i)=richiesta_base(i)+Q_totale(i);

```

```

149         end

151     end

153     area_ERR=1:Lung_t+1;
154         area_ERR_pos=1:Lung_t+1;
155         area_ERR_neg=1:Lung_t+1;
156         area_ERR(1)=0;
157         area_ERR_pos(1)=0;
158         area_ERR_neg(1)=0;
159         for n=1:Lung_t
160             area_ERR(n+1)=area_ERR(n)+passo*abs(ERR(n));
161             if ERR(n)>=0
162                 area_ERR_pos(n+1)=area_ERR_pos(n)+passo*abs(ERR(n));
163                 area_ERR_neg(n+1)=area_ERR_neg(n);
164             else
165                 area_ERR_neg(n+1)=area_ERR_neg(n)+passo*abs(ERR(n));
166                 area_ERR_pos(n+1)=area_ERR_pos(n);
167             end
168         end
169         tot_area_ERR      =(area_ERR(Lung_t+1))
170         tot_area_ERR_pos=(area_ERR_pos(Lung_t+1))
171         tot_area_ERR_neg=(area_ERR_neg(Lung_t+1))
172         area_ERR=integra(ERR,Lung_t,passo)

173         area_rich_tot=integra(richiesta_tot,Lung_t,passo)

175         v_ERR(j)=tot_area_ERR*passo/3600;
176         v_ERR_pos(j)=tot_area_ERR_pos*passo/3600;
177         v_ERR_neg(j)=tot_area_ERR_neg*passo/3600;

179         % richiesta_tot=smooth_r_t_on_off(richiesta_tot);
180         err(j,1:Lung_t)=ERR;

183         figure(j)
184         plot(t,richiesta_tot,t,RIF_PRODUZIONE,'linewidth',2),grid,
185         axis([0 Lung_t 0 3*10^6]),legend('Richiesta_t_o_t[W]','RiferimentoProduzione[W]','Location',
186         xlabel('tempo[ore:minuti]'),ylabel('richiesta_t_o_t, RiferimentoProduzione[W]'),
187         set(gca,'XTickLabel',{'00:00','04:00','08:00','12:00','16:00','20:00'})

189     end
190     fig=figure(30);
191     set(fig,'MenuBar','none');
192     set(fig,'ToolBar','none');
193     subplot(3,1,1),plot(t,rec_Th(NUM_UTENZE,:),:),grid,legend('Th[C]'),axis([0 Lung_t 10 80]),
194     xlabel('tempo[sec/pass]'),ylabel('TempWH[C]')
195     subplot(3,1,2),plot(t,rec_Q(NUM_UTENZE,:),:),grid,axis([0 Lung_t 0 1300]),legend('Q[W]'),
196     xlabel('tempo[sec/pass]'),ylabel('PotWH[W]')
197     subplot(3,1,3),plot(t,rec_Wd(NUM_UTENZE,:),:),grid,legend('Wd[L/s]'),axis([0 Lung_t 0 0.3]),

```

```

xlabel('tempo[sec/pass]'),ylabel('PortAcq[L/s]')
199
fig=figure(40);
201 set(fig, 'MenuBar', 'none');
set(fig, 'ToolBar', 'none');
203 subplot(2,1,1),plot(t,num_off,'linewidth',2),grid,legend('num_o_f_f'),
xlabel('tempo[sec/pass]'),ylabel('#_LWHspenti')
205 subplot(2,1,2),plot(t,num_on,'linewidth',2),grid,legend('num_o_n'),
xlabel('tempo[sec/pass]'),ylabel('#_LWHaccesi')
207

209 %QUESTA FUNZIONE ASSEGNA IL TIPO DI WH (50[L] O 80[L]) IN BASE AL NUMERO DEI
%COMPONENTI DEL NUCLEO FAMILIARE, SELEZIONATO RANDOM MA IN BASE ALLA STATISTICA
211 %DEL COMUNE DI CAGLIARI
function [C,G,num_comp,durata_max]=calcolaCGN_C()
213

215 %DATI POPOLAZIONE MEDI: FONTE COMUNE DI CAGLIARI, CENSIMENTO 2011

217 uno= 36.87;%1 componente per nucleo familiare=1 nel 36.87% dei casi
due= 27.38;%2 componenti per nucleo familiare=2 nel 27.38% dei casi
219 tre= 18.95;%3 componenti per nucleo familiare=3 nel 18.95% dei casi
quattro=12.50;%4 componenti per nucleo familiare=4 nel 12.50% dei casi
221 cinque= 3.13;%5 componenti per nucleo familiare=5 nel 3.13% dei casi
sei= 0.79;%6 componenti per nucleo familiare=6 nel 0.79% dei casi
223 sette= 0.38;%7 e piu' componenti per nucleo familiare=7 nel 0.38% dei casi

225 componenti_fam=1:7;

227 componenti_fam(1)=uno;
componenti_fam(2)=componenti_fam(1)+due;
229 componenti_fam(3)=componenti_fam(2)+tre;
componenti_fam(4)=componenti_fam(3)+quattro;
231 componenti_fam(5)=componenti_fam(4)+cinque;
componenti_fam(6)=componenti_fam(5)+sei;
233 componenti_fam(7)=componenti_fam(6)+sette;

235 %DATI WH
Cp=4186 ; %[J/KgC]calore specifico dell'acqua
237 D=1; %[kg/L]densita' dell'acqua

239 R=1; %[m^2C/W]Resistenza termica del WH
%SA=1.1; %superficie[m^2] per 50[L], 1.4[m^2] per 80[L], 1200[W] per tutti
241 %volume=50;%[L] volume in litri

243 SA_1=1.1;
SA_2=1.4;
245 volume_1=50;
volume_2=80;
247 durata_calda_max_1=5;%max durata[minuti]dei 50[L]di acqua contenuti nel WH

```

```

durata_calda_max_2=8;%max durata[minuti]dei 80[L]di acqua contenuti nel WH
249
%CREA UNA FUNZIONE comp_fam DI 100 PUNTI CHE HA L'ANDAMENTO DELLA STATISTICA
251

253 n_c=find(componenti_fam>rand(1)*100);
num_comp=n_c(1);
255
%assegna WH tipo_1 se il numero di componenti il nucleo familiare e' 1 o 2
257 %assegna WH tipo_2 se il numero di componenti il nucleo familiare e' > 2
if num_comp==1||num_comp==2
259     SA=SA_1;
        volume=volume_1;
261     durata_max=durata_calda_max_1;
else
263     SA=SA_2;
        volume=volume_2;
265     durata_max=durata_calda_max_2;
end
267
C=volume*D*Cp; % [L][Kg/L][J/KgC]=[J/C]
269 G=SA/R; % [W/C]

271
%funzionamento termostato
273 %Thp: Th precedente=Th(i-1); Th=Th(i)
function [Q]=calcolaQ5(Thp,Th,Tmin,Tmax,Pot)
275
% se le temperatura e' sopra il setpoint
277 % o se e' compresa tra Tmax e Tmin ma decrescente
% il WH va in OFF
279
if Th>=Tmax || ( Th<=Tmax && Th>=Tmin && Thp>=Th )
281
Q=0;
283 else
285 Q=Pot;
end
287
end
289
% Questa funzione, a partire dai dati di consumo totale ENEL forniti ogni
291 % 10 minuti, fornisce un vettore di consumo di Lung_t elementi da usare
% come riferimento per i consumi passo per passo
293
function [RICHIESTA]=calcolaRich(hh,passo,Lung_t)
295
%Richiesta=DATI ENEL
297

```

```

Richiesta=zeros(1,144); %inizializzazione vettore energia richiesta ogni 10 minuti
299 RICHIESTA=zeros(1,Lung_t);%inizializzazione vettore energia passo per passo

301 Richiesta(1)=1.61*10^-6;%[W]
Richiesta(2)=1.56*10^-6;
303 Richiesta(3)=1.54*10^-6;
Richiesta(4)=1.50*10^-6;
305 Richiesta(5)=1.45*10^-6;
Richiesta(6)=1.35*10^-6;
307 Richiesta(7)=1.27*10^-6;
Richiesta(8)=1.22*10^-6;
309 Richiesta(9)=1.21*10^-6;
Richiesta(10)=1.21*10^-6;
311 Richiesta(11)=1.21*10^-6;
Richiesta(12)=1.25*10^-6;
313 Richiesta(13)=1.10*10^-6;
Richiesta(14)=1.10*10^-6;
315 Richiesta(15)=1.14*10^-6;
Richiesta(16)=1.11*10^-6;
317 Richiesta(17)=1.07*10^-6;
Richiesta(18)=1.04*10^-6;
319 Richiesta(19)=1.10*10^-6;
Richiesta(20)=1.14*10^-6;
321 Richiesta(21)=1.14*10^-6;
Richiesta(22)=1.14*10^-6;
323 Richiesta(23)=1.14*10^-6;
Richiesta(24)=1.14*10^-6;
325 Richiesta(25)=1.16*10^-6;
Richiesta(26)=1.16*10^-6;
327 Richiesta(27)=1.16*10^-6;
Richiesta(28)=1.20*10^-6;
329 Richiesta(29)=1.18*10^-6;
Richiesta(30)=1.15*10^-6;
331 Richiesta(31)=1.20*10^-6;
Richiesta(32)=1.21*10^-6;
333 Richiesta(33)=1.22*10^-6;
Richiesta(34)=1.22*10^-6;
335 Richiesta(35)=1.22*10^-6;
Richiesta(36)=1.30*10^-6;
337 Richiesta(37)=1.33*10^-6;
Richiesta(38)=1.45*10^-6;
339 Richiesta(39)=1.55*10^-6;
Richiesta(40)=1.59*10^-6;
341 Richiesta(41)=1.61*10^-6;
Richiesta(42)=1.62*10^-6;
343 Richiesta(43)=1.73*10^-6;
Richiesta(44)=1.80*10^-6;
345 Richiesta(45)=1.89*10^-6;
Richiesta(46)=2.01*10^-6;
347 Richiesta(47)=2.09*10^-6;

```


Richiesta (48)=2.16*10⁻⁶;
349 Richiesta (49)=2.17*10⁻⁶;
Richiesta (50)=2.26*10⁻⁶;
351 Richiesta (51)=2.27*10⁻⁶;
Richiesta (52)=2.25*10⁻⁶;
353 Richiesta (53)=2.25*10⁻⁶;
Richiesta (54)=2.21*10⁻⁶;
355 Richiesta (55)=2.22*10⁻⁶;
Richiesta (56)=2.22*10⁻⁶;
357 Richiesta (57)=2.21*10⁻⁶;
Richiesta (58)=2.16*10⁻⁶;
359 Richiesta (59)=2.17*10⁻⁶;
Richiesta (60)=2.16*10⁻⁶;
361 Richiesta (61)=2.10*10⁻⁶;
Richiesta (62)=2.07*10⁻⁶;
363 Richiesta (63)=2.10*10⁻⁶;
Richiesta (64)=2.07*10⁻⁶;
365 Richiesta (65)=2.10*10⁻⁶;
Richiesta (66)=2.10*10⁻⁶;
367 Richiesta (67)=2.05*10⁻⁶;
Richiesta (68)=2.00*10⁻⁶;
369 Richiesta (69)=2.00*10⁻⁶;
Richiesta (70)=1.94*10⁻⁶;
371 Richiesta (71)=1.95*10⁻⁶;
Richiesta (72)=1.94*10⁻⁶;
373 Richiesta (73)=1.97*10⁻⁶;
Richiesta (74)=2.01*10⁻⁶;
375 Richiesta (75)=2.08*10⁻⁶;
Richiesta (76)=2.09*10⁻⁶;
377 Richiesta (77)=1.98*10⁻⁶;
Richiesta (78)=2.00*10⁻⁶;
379 Richiesta (79)=2.00*10⁻⁶;
Richiesta (80)=2.01*10⁻⁶;
381 Richiesta (81)=1.90*10⁻⁶;
Richiesta (82)=1.87*10⁻⁶;
383 Richiesta (83)=1.87*10⁻⁶;
Richiesta (84)=1.82*10⁻⁶;
385 Richiesta (85)=1.84*10⁻⁶;
Richiesta (86)=1.80*10⁻⁶;
387 Richiesta (87)=1.80*10⁻⁶;
Richiesta (88)=1.84*10⁻⁶;
389 Richiesta (89)=1.86*10⁻⁶;
Richiesta (90)=1.87*10⁻⁶;
391 Richiesta (91)=1.86*10⁻⁶;
Richiesta (92)=1.90*10⁻⁶;
393 Richiesta (93)=1.86*10⁻⁶;
Richiesta (94)=1.90*10⁻⁶;
395 Richiesta (95)=1.89*10⁻⁶;
Richiesta (96)=1.94*10⁻⁶;
397 Richiesta (97)=1.89*10⁻⁶;

Richiesta (98)=1.90*10⁻⁶;
399 Richiesta (99)=2.00*10⁻⁶;
Richiesta (100)=2.00*10⁻⁶;
401 Richiesta (101)=2.04*10⁻⁶;
Richiesta (102)=2.10*10⁻⁶;
403 Richiesta (103)=2.17*10⁻⁶;
Richiesta (104)=2.24*10⁻⁶;
405 Richiesta (105)=2.33*10⁻⁶;
Richiesta (106)=2.36*10⁻⁶;
407 Richiesta (107)=2.47*10⁻⁶;
Richiesta (108)=2.45*10⁻⁶;
409 Richiesta (109)=2.51*10⁻⁶;
Richiesta (110)=2.53*10⁻⁶;
411 Richiesta (111)=2.53*10⁻⁶;
Richiesta (112)=2.54*10⁻⁶;
413 Richiesta (113)=2.57*10⁻⁶;
Richiesta (114)=2.58*10⁻⁶;
415 Richiesta (115)=2.60*10⁻⁶;
Richiesta (116)=2.60*10⁻⁶;
417 Richiesta (117)=2.67*10⁻⁶;
Richiesta (118)=2.68*10⁻⁶;
419 Richiesta (119)=2.77*10⁻⁶;
Richiesta (120)=2.72*10⁻⁶;
421 Richiesta (121)=2.67*10⁻⁶;
Richiesta (122)=2.64*10⁻⁶;
423 Richiesta (123)=2.61*10⁻⁶;
Richiesta (124)=2.64*10⁻⁶;
425 Richiesta (125)=2.58*10⁻⁶;
Richiesta (126)=2.50*10⁻⁶;
427 Richiesta (127)=2.48*10⁻⁶;
Richiesta (128)=2.47*10⁻⁶;
429 Richiesta (129)=2.46*10⁻⁶;
Richiesta (130)=2.39*10⁻⁶;
431 Richiesta (131)=2.36*10⁻⁶;
Richiesta (132)=2.27*10⁻⁶;
433 Richiesta (133)=2.21*10⁻⁶;
Richiesta (134)=2.15*10⁻⁶;
435 Richiesta (135)=2.04*10⁻⁶;
Richiesta (136)=2.00*10⁻⁶;
437 Richiesta (137)=1.98*10⁻⁶;
Richiesta (138)=1.96*10⁻⁶;
439 Richiesta (139)=1.93*10⁻⁶;
Richiesta (140)=1.87*10⁻⁶;
441 Richiesta (141)=1.80*10⁻⁶;
Richiesta (142)=1.77*10⁻⁶;
443 Richiesta (143)=1.77*10⁻⁶;
Richiesta (144)=1.70*10⁻⁶;

445

447 *%per passare da un dato ogni 10 minuti ad un dato ogni passo*

```

    for i=1:144
449         for k=((i-1)*hh/(6*passo)+1):(i*hh/(6*passo))
                RICHIESTA(k)=Richiesta(i);
451         end
    end
453

455 function [richiesta_base]=calcolaRich_Base(hh,passo,Lung_t)

457
    Richiesta_base=zeros(1,12);
459    richiesta_base=zeros(1,Lung_t);

461    Richiesta_base(1)=1.5*10^6; %[W]
    Richiesta_base(2)=1.2*10^6;
463    Richiesta_base(3)=1.0*10^6;
    Richiesta_base(4)=0.0*10^6;
465    Richiesta_base(5)=0.5*10^6;
    Richiesta_base(6)=1.2*10^6;
467    Richiesta_base(7)=1.5*10^6;
    Richiesta_base(8)=1.0*10^6;
469    Richiesta_base(9)=0.5*10^6;
    Richiesta_base(10)=0.8*10^6;
471    Richiesta_base(11)=1.2*10^6;
    Richiesta_base(12)=1.5*10^6;
473

475
    for i=1:12
477         for k=((i-1)*hh/(0.5*passo)+1):(i*hh/(0.5*passo))%6
                richiesta_base(k)=Richiesta_base(i);
479         end
    end
481
    for i=1:Lung_t
483         if richiesta_base(i)<0
                richiesta_base(i)=0;
485         end
    end
487
    [b a]=butter(4,0.005,'low');
489    % freqz(b,a,100);
    richiesta_base=filtfilt(b,a,richiesta_base);
491
    end
493
    % Questa funzione costruisce un vettore di Lung_t elementi, a partire da un
495    % vettore di 24 elementi di valore di energia oraria (da acquistare
    % preventivamente e poi mettere in rete, per soddisfare il fabbisogno rela
497    % tivo a tutta l'energia richiesta)

```

```

function [RIF_PRODUZIONE]=calcolaRiferimentoProduzione(hh,passo,Lung_t)
499
%DATI ENERGIA PRODOTTA,SUPPOSTI NOTI A PRIORI
501 %inizializzazione vettore energia acquistata ora per ora
    Produzione=zeros(1,24);
503 %inizializzazione vettore energia acquistata passo per passo
    RIF_PRODUZIONE=zeros(1,Lung_t);
505
507     Produzione(1)=0.5*10^6; %[W]
508     Produzione(2)=1.6*10^6; %[W]
509     Produzione(3)=1.4*10^6; %[W]
510     Produzione(4)=1.4*10^6; %[W]
511     Produzione(5)=1.1*10^6; %[W]
512     Produzione(6)=1.3*10^6; %[W]
513     Produzione(7)=1.8*10^6; %[W]
514     Produzione(8)=1.9*10^6; %[W]
515     Produzione(9)=2.1*10^6; %[W]
516     Produzione(10)=2.1*10^6; %[W]
517     Produzione(11)=2.1*10^6; %[W]
518     Produzione(12)=2.1*10^6; %[W]
519     Produzione(13)=1.0*10^6; %[W]
520     Produzione(14)=2.1*10^6; %[W]
521     Produzione(15)=2.5*10^6; %[W]
522     Produzione(16)=1.0*10^6; %[W]
523     Produzione(17)=1.2*10^6; %[W]
524     Produzione(18)=1.9*10^6; %[W]
525     Produzione(19)=1.9*10^6; %[W]
526     Produzione(20)=1.9*10^6; %[W]
527     Produzione(21)=2.2*10^6; %[W]
528     Produzione(22)=2.0*10^6; %[W]
529     Produzione(23)=2.0*10^6; %[W]
530     Produzione(24)=2.0*10^6; %[W]
531
    %per passare da un dato ogni ora ad un dato ogni passo
533     for i=1:24
534         for k=((i-1)*hh/pass+1):(i*hh/pass)
535             RIF_PRODUZIONE(k)=Produzione(i);
536         end
537     end
538
539 [b a]=butter(4,0.005,'low');
    % freqz(b,a,100);
541 RIF_PRODUZIONE=filtfilt(b,a,RIF_PRODUZIONE);
542
543 end
544
545 %Questa funzione calcola la matrice di assegnazione degli stacchi/attacchi per i WH
546 %in funzione della politica programmata e dei suoi obiettivi
547

```

```

function [STACCHI]=calcolaSTACCHI5_on_off (STACCHI,num_off,num_on,ERR,NUM_UTENZE,
549 mm,passo,rec_Q,Pot,i)

551
    if ERR >=0
553 %eventuale(ad es da 1 a 1.2 per 20%) incremento utenti staccati per ogni passo,
    %per avere una matrice che ne stacca piu' dello stretto necessario per avere una
555 %convergenza dell'errore piu' veloce
        incremento=1;
557 ut=floor(num_off*incremento) ;
        if ut>NUM_UTENZE
559 ut=NUM_UTENZE;
        end
561 i_start_off=floor(rand(1)*(NUM_UTENZE-ut-1));%per non staccare sempre
    % gli stessi utenti, inizio(per ogni i) la sequenza da un punto(i_start) diverso
563 c_off=i_start_off+2;
        u=1;
565 while u<ut && abs(ERR)>Pot

567         while rec_Q(c_off,i)==0 && c_off~=i_start_off-1 %se era staccato
            c_off=c_off+1; %controlla il successivo
569
            if c_off==NUM_UTENZE
571 c_off=1;
            end
573 end

575

577 STACCHI(c_off,i+1)=0; %stacca utente c-esimo
    c_off=c_off+1;

579
581 if c_off>=NUM_UTENZE-2 %controlla se e' arrivato alla fine
    c_off=1; %in tal caso, riinizia dal primo
583 end

    %per non staccare lo stesso utente per troppo tempo
585 delta=15*mm/passo; %intervallo di tempo massimo per cui
    % rimane staccato un WH: 15 minuti
587 delta_1=floor(delta*0.5);

589 if i>delta
    %se era consecutivamente staccato per i precedenti delta passi
591
        if sum(STACCHI(c_off,i-delta:i))==0
593 STACCHI(c_off,i+1)=1; %riattacalo

595 end

597 %per evitare stacchi-attacchi consecutivi

```

```

s_1=sum(STACCHI(c_off,i-delta_1:i));
599
    if s_1==0                                %se era staccato per i precedenti delta_1 passi,
601        STACCHI(c_off,i+1)=1;                %riattacalo
        elseif s_1==delta_1;                  %se era attaccato per i precedenti delta_1 passi
603            STACCHI(c_off,i+1)=0;          %staccalo
        else
605            STACCHI(c_off,i+1)=STACCHI(c_off,i); %lascialo come nello stato precedente
    end
607
    end
609    u=u+1;
    end
611

613    else                                     %in caso di errore negativo si attaccano gli WH per accumulare energia
        %eventuale(ad es da 1 a 1.2 per 20%) incremento utenti attaccati per ogni passo, per avere
615        %una matrice che ne attacca piu' dello stretto necessario per avere una convergenza
        %dell'errore piu' veloce
617        incremento=1;
        ut=floor(num_on*incremento) ;
619        if ut>NUM_UTENZE
            ut=NUM_UTENZE;
621        end

623        i_start_on=floor(rand(1)*(NUM_UTENZE-ut-1));%per non attaccare sempre gli
        % stessi utenti, inizio la sequenza da un punto diverso
625        c_on=i_start_on+2;
        u=1;
627        while u<ut && abs(ERR)>Pot
            %se era staccato e non li hai controllati tutti
629            while rec_Q(c_on,i)==0 && c_on~=i_start_on-1
                c_on=c_on+1;                    %controlla il successivo
631
                if c_on==NUM_UTENZE            %se sei arrivato all'ultimo...
633                    c_on=1;                    %continua dal primo
                end
635            end

637
        STACCHI(c_on,i+1)=1;                    %attacca utente c-esimo
639        c_on=c_on+1;

641        if c_on>=NUM_UTENZE-2
            c_on=1;
643        end

645        %per non attaccare lo stesso utente per troppo tempo
        delta=15*mm/passaggio; %intervallo di tempo max per cui rimane attaccato un WH 15 min
647        delta_1=floor(delta*0.5);

```

```

649         if i>delta
651     %se era consecutivamente attaccato per i precedenti delta passi
653         if sum(STACCHI(c_on,i-delta:i))==delta
654             STACCHI(c_on,i+1)=0;           %staccalo
655         end
657     %per evitare stacchi-attacchi consecutivi
659     s_1=sum(STACCHI(c_on,i-delta_1:i));
661     if s_1==delta_1           %se era attaccato per i precedenti delta_1 passi,
662         STACCHI(c_on,i+1)=0;   %staccalo
663     elseif s_1==0;           %se era staccato per i precedenti delta_1 passi
664         STACCHI(c_on,i+1)=1; %riattacalo
665     else %lascialo come nello stato precedente
666         STACCHI(c_on,i+1)=STACCHI(c_on,i);
667     end
669     end
670     u=u+1;
671     end
672     end
673 end
675 %Questa funzione calcola il consumo istantaneo di acqua calda e relativo
676 %vettore B
677 %a partire dal consumo medio di acqua calda(Wd_medio_C) supposto a priori
678 %noto come modello, tenendo conto del numero di componenti il nucleo
679 %familiare relativo all'utenza considerata e conseguente tipo di WH.
681 %noti:
683 % passo=10;           % epsilon, passo di integrazione
684 % mm=60*ss;           % un minuto m = 60 secondi s
685 % hh=60*mm;           % un ora h = 60 minuti
686 % fattore miscelazione= percentuale miscelazione tra acqua calda e fredda
687 % durata_max          = massima durata (5/8)[minuti]dei (50/80)[L]di acqua calda
688 % contenuti nel WH del tipo 1/2 (da 50/80 litri)
689 % num_comp            = numero componenti del nucleo familiare relativo all'utenza
690 % Pq=0.20;           = portata media rubinetto domestico in [L/s]
691
692 function [Wd,B]=calcolaWd(Pq,fattore_miscelazione,durata_max,num_comp,mm,hh,passo,Lung_t)
693
694 Cp=4186 ;           %[J/KgC]calore specifico dell'acqua
695 D=1;               %[kg/L]densita' dell'acqua
697 uso_calda=1;       %inizializzazione percentuale apertura rubinetto calda

```

```

Wd=zeros(1,Lung_t); %inizializzazione vettore consumi acqua itantanei Wd
699 B=zeros(1,Lung_t); %inizializzazione B

701 % PROFILO MEDIO CONSUMI ACQUA
Wd_medio_C=zeros(1,24);
703
Wd_medio_C(1)=0;
705 Wd_medio_C(2)=0;
Wd_medio_C(3)=0.01;
707 Wd_medio_C(4)=0.05;
Wd_medio_C(5)=0.10;
709 Wd_medio_C(6)=0.40;
Wd_medio_C(7)=0.70;
711 Wd_medio_C(8)=0.80;
Wd_medio_C(9)=0.75;
713 Wd_medio_C(10)=0.2;
Wd_medio_C(11)=0.1;
715 Wd_medio_C(12)=0.1;
Wd_medio_C(13)=0.2;
717 Wd_medio_C(14)=0.4;
Wd_medio_C(15)=0.1;
719 Wd_medio_C(16)=0.1;
Wd_medio_C(17)=0.5;
721 Wd_medio_C(18)=0.9;
Wd_medio_C(19)=0.8;
723 Wd_medio_C(20)=0.7;
Wd_medio_C(21)=0.6;
725 Wd_medio_C(22)=0.2;
Wd_medio_C(23)=0.1;
727 Wd_medio_C(24)=0.1;

729 for i= 1 : 24          % per ogni tratto relativo al consumo medio d'acqua

731         r=rand(1);
        %uso come soglia per stabilire se il fattore sara' 0 o 1 il dato Wd_medio stesso
733         if r<Wd_medio_C(i)
                fattore=1;          %rubinetto aperto
735                 uso_calda=0.5+rand(1)*0.5;%percentuale di apertura rubinetto
                % (non sempre la portata e' quella massima Pq)
737
                else
739                 fattore=0;          %rubinetto chiuso
                end
741         %Wd(t): DATO IN INGRESSO consumo d'acqua[L/s]
        %per avere il consumo d'acqua, istante per istante (cioe' passo per passo) k deve andare,
743         %per i che va da mezzanotte all'una da 1 a 3600 secondi ad es se il passo e' un secondo;
        %per i che va dall'una alle due da 3601 a 7200 etc etc
745
                k_in=((i-1)*hh/passo+1);
747                 k_fin=(i*hh/passo);

```



```

749         for k= k_in:k_fin;           %durante ogni tratto Wd_medio

751             Wd(k)=fattore*Pq*uso_calda*fattore_miscelezione;

753             if k>durata_max*mm*num_comp/passo+k_in
754 %se il consumo consecutivo supera la durata_max*num_comp-->Wd=0
755                 Wd(k)=0;
756             end
757         end

759     end

761 %CALCOLO B

763         B=D*Wd*Cp;    %[Kg/L][L/s][J/KgC]=[J/s][1/C]=[W/C]

765     end

767 %Questa funzione calcola il numero di WH da disinserire/inserire passo per passo per
768 %azzerare l'errore, inteso come differenza tra energia consumata
769 %ed energia fornita dalla rete

771

773     function[num_off,num_on]=calcoloNumOffOn5(ERR,Pot)

775         if ERR>0
776             num_off=floor(ERR/Pot);%vettore di numero di WH da disinserire passo per passo
777             num_on=0;
778         else
779             num_off=0;
780             num_on=ceil(abs(ERR)/Pot);%vettore di numero di WH da inserire passo per passo
781         end
782     end

783     end

785

787     function[area]=integra(vettore,lunghezza,passo)

789     area=0;
790     for n=1:lunghezza
791         area=area+passo*abs(vettore(n));
792     end

793     end

795

797     end

```

```

799 %Questa funzione calcola per il singolo utente e per ogni passo, il valore
800 %della temperatura(Th) dell'acqua all'interno del WH e lo stato(Q) del WH
801 %(on/off) utilizzando il metodo di integrazione Runge-Kutta
802 %prende Th,B,Q al passo i-iesimo e li restituisce al passo iesimo (Th1=Th(i-1))
function [Th,Q]=RK5_on_off(C,G,Tout,Tin,Tmax,Tmin,Pot,STACCHI,utenze,B,passo,j,Th1,Q)
803
804 isteresiTmax=2;%[C]
805 isteresiTmin=2;%[C]
806
807 %Th(t)= temperatura dell'acqua nel WH al tempo t [C] dall'equazione
808 % C*Th'(t)=-SA*(1/R)*(Th(t)-Tout)-D*Wd(t)*Cp*(Th(t)-Tin)+Q(t)
809
810 % RUNGE-KUTTA
811
812 k1=(1/C)*(-G*(Th1-Tout) -B*(Th1-Tin) +Q);
813
814 thx =Th1+k1*passo/2;
815 k2=(1/C)*(-G*(thx -Tout) -B*(thx-Tin ) +Q);
816
817 thx =Th1+k2*passo/2;
818 k3=(1/C)*(-G*(thx -Tout) -B*(thx-Tin ) +Q);
819
820 thx =Th1+k3*passo;
821 k4=(1/C)*(-G*(thx -Tout) -B*(thx-Tin ) +Q);
822
823 Th=Th1 +passo/6*( k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4);
824
825
826 %Q(t): DATO IN USCITA, CONSUMO ENERGIA ELETTRICA[W] del WH
827
828 Q= calcolaQ5(Th1,Th,Tmin,Tmax,Pot);
829
830 if j==1
831 STACCHI(utenze)=2;%al 1ciclo non fa niente
832 end
833 if j>1
834
835 if STACCHI(utenze)==0
836 if Th>=Tmin+isteresiTmin
837 Q=0;
838 else
839 %
840 Q=Q;
841 end
842 end
843 if STACCHI(utenze)==1
844 if Th<=Tmax-isteresiTmax
845 Q=Pot;
846 else

```

```

            Q=Q;
849         end

851     end
        if STACCHI(utenze)==2
853         Q= calcolaQ5(Th1,Th,Tmin,Tmax,Pot);
        end
855     end

857     end

859 function[richiesta_base]=smooth_r_b(richiesta_base,Lung_t)

861 % richiesta_base=smooth(richiesta_base,10,'lowess');

863 for i=1:Lung_t
    if richiesta_base(i)<0
865         richiesta_base(i)=0;
        end
867 end

869 [b a]=butter(4,0.0005,'low');
    % freqz(b,a,100);
871 richiesta_base=filtfilt(b,a,richiesta_base);

873 end

875 function[richiesta_tot]=smooth_r_t_on_off(richiesta_tot)

877     [b a]=butter(4,0.005,'low');
879 % freqz(b,a,100);
    richiesta_tot=filtfilt(b,a,richiesta_tot);

```
