



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



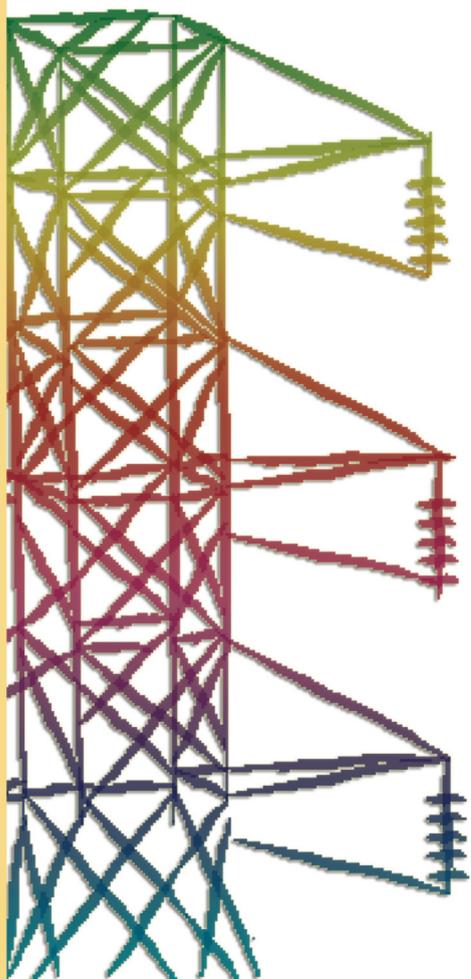
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Sviluppo dell'ambiente di progettazione Optimal DESign for Smart Energy - ODESSE**

**I. Bertini, F. Ceravolo, M. De Felice, B. Di Pietra, F. Margiotta,  
S. Pizzuti, G. Puglisi**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

## Sviluppo dell'ambiente di progettazione Optimal DESign for Smart Energy - ODESSE

*I. Bertini, F. Ceravolo, M. De Felice, B. Di Pietra, F. Margiotta,  
S. Pizzuti, G. Puglisi*



SVILUPPO DELL'AMBIENTE DI PROGETTAZIONE OPTIMAL DESIGN FOR SMART ENERGY -  
ODESSE

I. Bertini, F. Ceravolo, M. De Felice, B. Di Pietra, F. Margiotta, S. Pizzuti, G. Puglisi (ENEA)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana

Responsabile Tema: Ilaria Bertini, ENEA

|   |    |
|---|----|
| Introduzione .....  | 5  |
| 1. Stato dell'arte della simulazione energetica degli edifici.....                                    | 9  |
| 2. Approccio metodologico .....   | 11 |
| 2.1 Modello matematico della temperatura interna dell'edificio.....                                   | 11 |
| 2.2 Calcolo del fabbisogno termico dell'edificio .....  | 14 |
| 2.3 Calcolo dei consumi elettrici dell'edificio .....   | 17 |
| 3. Interfaccia ODESSE.....  | 19 |
| 3.1 Dati Generali.....  | 20 |
| 3.2 Chiusure verticali e Chiusure orizzontali .....   | 21 |
| 3.3 DataBase.....   | 26 |
| 3.4 Ponti Termici .....   | 27 |
| 3.5 Impianti .....  | 30 |
| 3.6 Schede riepilogative.....   | 32 |
| 4. Neural Weather Generator: una metodologia innovativa per la<br>generazione di dati climatici ..... | 35 |
| 4.1 Introduzione .....  | 35 |
| 4.2 La teoria degli insiemi sfumati.....  | 36 |
| 4.2 Le reti neurali.....  | 39 |
| 4.3 Gli algoritmi genetici (GA).....  | 44 |
| 4.4 Approcci ibridi .....   | 46 |
| 4.5 La radiazione solare .....  | 48 |
| 4.6 La temperatura ambientale.....  | 49 |
| 4.7 Sperimentazione .....   | 49 |
| 4.8 Osservazioni finali.....  | 60 |
| 5. Modello matematico dell'edificio .....   | 62 |
| 5.1 Carico termico invernale .....  | 62 |
| 5.2 Apporto termico solare: $Q_{sol}$ .....   | 64 |
| 5.3 Apporto termico solare attraverso le pareti verticali: $Q_{par}$ .....                            | 70 |
| 5.4 Apporti termici interni: $Q_{int}$ [kW] .....   | 71 |
| 5.4.1 Apporti termici degli occupanti.....  | 71 |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 5.4.2  | Apporto termico per illuminazione ( $Q_{ill}$ ).....   | 73         |
| 5.5  | Dispersione di calore per conduzione attraverso le chiusure opache e trasparenti ( $Q_{disp}$ )..... | 74         |
| 5.6  | Dispersione di calore per ventilazione e infiltrazione $Q_v$ .....                                   | 76         |
| 5.7  | Carico termico estivo .....  | 77         |
| 5.8  | Temperatura interna .....  | 81         |
| 5.9  | Validazione del modello dinamico dell'edificio.....  | 82         |
| 5.9.1  | Introduzione.....  | 82         |
| 5.9.2  | Edifici di riferimento:.....   | 83         |
| 5.9.3  | Risultati del confronto TRNSYS – ODESSE per il periodo invernale.....                                | 87         |
| <b>Appendice A: Ambiente di sviluppo .....</b> |  | <b>91</b>  |
| A.1  | Simulink .....   | 92         |
| A.2  | Real-Time Workshop.....  | 96         |
| A.3  | Distribuzione ODESSE.....  | 97         |
| <b>Appendice B: Elenco Normative.....</b>      |  | <b>98</b>  |
| <b>Bibliografia .....</b>                      |  | <b>100</b> |

## Introduzione

Le attuali politiche europee sulla efficienza energetica, centrate sull'uso razionale dell'energia e sulla compatibilità ambientale dei sistemi energetici, hanno elevato considerevolmente le informazioni sulle singole tecnologie, e la disponibilità di normative forzanti o incentivanti rendono economicamente attraente il ricorso alle tecnologie efficienti ed alla integrazione delle fonti rinnovabili facendo crescere la domanda di tali tecnologie.

Tutto ciò ha messo in atto un cambiamento che coinvolge in modo molto più significativo le abitudini del cittadino. Attraverso l'attuazione di azioni di policy mirata, tali tecnologie entrano nella sua casa, cambiano i criteri di scelta negli acquisti ed i comportamenti, stimolano l'aspirazione a produrre autonomamente l'energia di cui ha bisogno.

I consumi energetici del settore Civile crescono del 2% l'anno. Questo fenomeno è dovuto alla crescita dei consumi elettrici, in particolare negli ultimi anni a quelli per il condizionamento estivo. Il picco di assorbimento di potenza elettrica estiva ormai supera sistematicamente quello invernale. Si può sommariamente valutare che almeno il 15% delle abitazioni italiane siano dotate di un sistema di raffrescamento estivo. Siamo ancora lontani dal 50% degli USA e ciò fa pensare a ulteriori incrementi della domanda con gravissimi problemi per il nostro sistema produttivo e di gestione.

Dall'analisi dell'indice ODEX di efficienza energetica per il settore residenziale emerge che nei primi anni 90 c'è stato un più rapido miglioramento nella efficienza energetica che è rallentato negli ultimi anni quando il passo italiano ha mostrato una velocità più bassa rispetto alla media europea. Alcuni di questi limiti sono da ricercare nelle *barriere non tecnologiche* tra cui, in particolare, le difficoltà autorizzative e normative che frenano la generazione distribuita, il mercato ancora instabile dei titoli di efficienza energetica e un grado di informazione e formazione dei settori professionali e dei cittadini non ancora adeguato.

Altri limiti sono invece da ricercare nelle *barriere tecnologiche* legate soprattutto alla mancanza di tecnologie di sistema in grado di affrontare il problema nella sua intera complessità. L'offerta industriale è frammentata in attori che offrono componenti del sistema (edifici, macchine, pannelli fotovoltaici, sistemi di controllo, sistemi di illuminazione) perdendo di vista la loro integrazione in una unica cornice che consideri l'intero sistema edificio-impianto, se non l'intero distretto energetico. Questa frammentarietà di standard, linguaggi e specializzazioni, lascia sul terreno gran parte del potenziale di efficienza energetica e fonti rinnovabili che potrebbe essere sfruttato. Esiste inoltre una specificità dell'area Mediterranea che rende poco adattabili soluzioni già sperimentate nel Nord Europa non soltanto per motivi tecnici quanto per motivi di economia dovuti alla diversa ripartizione dei consumi tra estate ed inverno, alla forte presenza di centri storici ed all'intensa urbanizzazione. L'approccio complessivo va quindi ridefinito ed occorre passare dall'idea di una efficienza legata alla sostituzione del componente verso l'idea dello sviluppo di architetture energetiche mediterranee sistemiche e integrate.

Tale modello per ENEA si concretizza nel paradigma dei distretti energetici, ovvero insediamenti di varia natura (residenziale, non residenziale, industriale) in cui attraverso un mix di soluzioni tecnologiche è possibile ottimizzare l'interazione tra consumo e generazione locale dell'energia riducendo i consumi e ricorrendo quanto più possibile ed economicamente compatibile, alle fonti rinnovabili. Tale modello offre la possibilità non solo di integrare un cluster di tecnologie (e di aziende) ma anche di stabilire nuove ed organiche relazioni in tutta la filiera, dall'utente, ai produttori, all'integratore, al gestore, al finanziatore, alla pubblica amministrazione, al mondo della ricerca. La visione integrata del distretto energetico permette di ottimizzare la progettazione dell'intero sistema (eco-buildings, impianti di generazione distribuita, RES) agendo contestualmente sulla minimizzazione dei consumi delle singole utenze, sulla produzione locale ed economica dell'energia, sulla integrazione delle fonti rinnovabili, sulla gestione ottimale del sistema.

I problemi fondamentali su cui la progettazione classica di ecobuilding (edifici con caratteristiche di bassi o zero consumi ) e di distretti energetici trova le maggiori difficoltà, consistono:

- nell'inefficienza degli approcci stazionari quando i sistemi da progettare assumono un consistente grado di complessità;
- nella mancanza di una tecnologia contenitore dove è possibile analizzare nello stesso momento le interazioni tra edifici, sistemi di generazione dell'energia, utenze termoelettriche variabili, condizioni climatiche variabili, presenza di fonti rinnovabili, problematiche di vincoli prestazionali, valutazioni di carattere normativo ed economico-finanziario.

Nel primo caso la progettazione stazionaria non riesce a valutare con accuratezza le ore lavoro delle varie macchine che compongono il mix energetico e come questo si riflette nelle situazioni di criticità, in quanto nel caso stazionario appunto il calcolo viene eseguito solo in alcuni periodi di riferimento maggiormente sollecitati. Questo approccio da quindi scarsa possibilità di valutare gli aspetti economici degli interventi e le criticità di gestione.

Nel secondo caso la disponibilità di piattaforme di calcolo che analizzano separatamente i vari elementi del sistema (edifici e impianti), riduce fortemente la possibilità di valutare appieno le interazioni tra i componenti e di creare un circuito di ottimizzazione progressiva del progetto, che rimarrà essenzialmente circoscritto nell'ambito dell'esperienza del progettista.

È ormai noto che l'impiego di soluzioni innovative con un potenziale di efficientamento più elevato richiede una progettazione ottimizzata e assistita da simulazioni dinamiche del sistema edificio-impianti.

Per superare queste limitazioni ENEA sta sviluppando una piattaforma software (ODESSE - Optimal DESign for Smart Energy) in grado di simulare dinamicamente l'esercizio di fonti energetiche funzionanti in generazione distribuita al servizio d'utenze reali (edifici) e con condizioni tariffarie, fiscali e normative reali.

L'importanza di disporre di un modello dinamico del sistema, in generale, sta nella possibilità di poter valutare a priori il comportamento della sezione di generazione al variare del carico termico ed elettrico dell'edificio, dando la possibilità al progettista di valutare l'integrazione di più tecnologie ad alta efficienza energetica (fonti rinnovabili, cogenerazione, solar cooling, etc) in funzione delle caratteristiche meteo del sito e le richieste del contesto territoriale.

In Italia ci sono 27,5 milioni di costruzioni, distribuite in maniera non omogenea in zone che coprono fasce climatiche con gradi giorno da 600 ad oltre 3000 e con una densità immobiliare maggiore nelle fasce climatiche D ed E.

I principali consumi energetici relativi al settore civile sono dovuti al riscaldamento degli ambienti abitati. In particolare, nel residenziale, sono stimati i seguenti valori:

- fabbisogno energetico edificio di vecchia costruzione (ante Dlg 373/73): 150 kWh/m<sup>2</sup>\*a
- fabbisogno energetico convenzionale Italiano (post Dlg 10/90): 100 kWh/m<sup>2</sup>\*a

Lo standard europeo degli edifici a basso consumo (Low energy Building) è: 25 - 60 kWh / (m<sup>2</sup>\*a)

La situazione del parco edilizio italiano risulta essere composta come segue:

- circa 13 milioni di edifici (in 26,5 milioni di unità abitative, occupate da 21 milioni di famiglie)
- circa 11 milioni anteriori alla DLg. 373/73
- 100-150 mila nuove unità/anno, in circa 70 mila edifici, pari a circa lo 0,6% dell'esistente.

Da questi dati si evince l'importanza di disporre di uno strumento di simulazione dinamica del sistema edificio-impianto come ODESSE per la progettazione integrata di interventi di riqualificazione dell'involucro edilizio e degli impianti ad esso asserviti in modo da ottenere un abbattimento dei consumi energetici, in particolare per il parco edilizio esistente, fino ad adeguare i consumi allo standard europeo (low energy building).

ODESSE è uno strumento di modellazione dinamica che consente di stimare la fattibilità tecnico-economica di un intervento per la riqualificazione energetica di un edificio o di un quartiere esistente e vuole essere un supporto determinante nella progettazione di edifici ecosostenibili.

Per la gestione ottimale integrata del sistema è necessario tenere conto di diversi fattori: i consumi delle singole utenze, la produzione locale di energia con l'eventuale integrazione di fonti rinnovabili. Questo comporta una progettazione mirata e contestualizzata, ma anche la definizione di nuove ed organiche relazioni in tutta la filiera, dall'utente, ai produttori, all'integratore, al gestore, al finanziatore, alla pubblica amministrazione, al mondo della ricerca. La piattaforma software ODESSE è in grado di simulare dinamicamente l'esercizio di fonti energetiche funzionanti in generazione distribuita al servizio d'utenze reali (edifici) e con condizioni tariffarie, fiscali e normative reali. Il progettista può quindi valutare l'integrazione di più tecnologie ad alta efficienza energetica (fonti rinnovabili, cogenerazione, solar cooling, ecc) in funzione delle caratteristiche meteo del sito e le richieste del contesto territoriale, in modo da aumentarne la sostenibilità e la competitività.

La piattaforma ODESSE è costituita da alcuni moduli fondamentali:

- Interfaccia utente, utilizzata per inserire i dati di input utili alla simulazione (le caratteristiche fisiche, strutturali e geometriche degli edifici in esame), scegliere il mix e la taglia del sistema di poligenerazione (incluse le fonti rinnovabili), impostare le variabili che si vuole monitorare. L'interfaccia è stata studiata e sviluppata secondo criteri di semplicità, chiarezza e intuitività in modo da semplificarne l'utilizzo anche ad un utente poco esperto di simulazione dinamica.
- Data base materiali per opere civili, costruito in conformità alle norme UNI, ampliato con biomateriali innovativi
- Pre-processore, calcola i parametri termici fondamentali dell'edificio, i guadagni interni dovuti al profilo di utilizzo degli ambienti e delle apparecchiature elettriche (PC, illuminazione artificiale), ponti termici.
- Simulatore dinamico, motore di calcolo per valutare il carico termico orario, il fabbisogno annuo di energia primaria (FEP) delle sorgenti distribuite e i costi annui per la climatizzazione invernale ed estiva in funzione dell'irraggiamento solare e della temperatura esterna. Per il calcolo della radiazione oraria sull'involucro e la temperatura oraria del sito ODESSE utilizza un sistema di calcolo sviluppato da ENEA (Neural Weather Generator, vedi cap. successivo) che, a differenza dei modelli esistenti in cui i dati climatici sono sostanzialmente letti da un database che riporta valori storici di varie località, si basa sulla previsione di tali valori attraverso reti neurali evolutive.
- Post-processore, fornisce i risultati della simulazione dinamica sotto forma di diagrammi o indicatori prestazionali del sistema edificio impianto: (es. fabbisogno energetico per il riscaldamento e raffrescamento, fabbisogno annuo netto di energia elettrica, costo totale annuo di combustibile, costo energia elettrica prelevata dalla rete, guadagno annuo per energia elettrica da fonte rinnovabile ceduta alla rete, ecc).

La piattaforma è implementata in Matlab/Simulink, ma nella versione definitiva si presenterà come un unico applicativo eseguibile di dimensioni contenute che potrà essere facilmente distribuito anche via internet, come descritto dettagliatamente in appendice A.

Un altro importante vantaggio di ODESSE risiede nel fatto di rappresentare un eccellente strumento di pianificazione e di programmazione di azioni di policy con cui è possibile effettuare studi analitici del parco edilizio (catasto energetico, calcolo dei fabbisogni energetici, caratterizzazioni delle strutture, ecc.) e simulare l'effetto di nuove norme o di incentivi relativamente ai risparmi ottenibili nel segmento e ai tempi di ritorno degli investimenti.

In tal senso, la piattaforma ODESSE è stata già utilizzata per realizzare uno studio commissionato da ARTI<sup>1</sup> ad ENEA, finalizzato alla stima del potenziale di risparmio energetico nell'edilizia residenziale e nel terziario in Puglia.

L'analisi non è stata condotta con metodi tradizionali basati sulla valutazione statistica dei consumi energetici, ma con un approccio più sistematico secondo le seguenti fasi:

- analisi del patrimonio immobiliare;
- determinazione degli edifici di riferimento;
- stima dei consumi energetici (fabbisogno termico invernale) dello stato attuale, attraverso simulazione dinamiche (che simulano l'effettivo funzionamento degli impianti e dell'edificio durante l'arco di un anno, tenendo conto delle variazioni orarie della temperatura e dell'irraggiamento);
- ipotesi di interventi di riqualificazione energetica
- stima del potenziale massimo di risparmio energetico ottenibile

I risultati ottenuti con tempistiche minori rispetto agli strumenti comunemente utilizzati in questo tipo di analisi si sono rivelati molto accurati, evidenziando la validità di ODESSE come strumento di pianificazione energetica.

---

<sup>1</sup> Agenzia Regionale per la Tecnologia e l'Innovazione della Regione Puglia

## 1. Stato dell'arte della simulazione energetica degli edifici

La crescente richiesta di edifici ad alte prestazioni energetiche e l'evoluzione della normativa tecnica di riferimento, in materia di contenimento dei consumi energetici, richiedono l'utilizzo di codici di calcolo che consentano l'analisi energetica dell'edificio nuovo o esistente con diversi livelli di dettaglio.

La scelta del software commerciale spesso è tutt'altro che banale; la grande varietà di codici di calcolo disponibili si differenziano per regimi di calcolo, per algoritmi di calcolo impiegati, per tipologia di interfaccia grafica.

Attualmente è possibile distinguere i codici di calcolo in regime stazionario o dinamico e se assistiti da una interfaccia grafica o con inserimento manuale dei dati di input.

Si riportano di seguito alcuni tra i più importanti software commerciali utilizzati per la simulazione degli edifici (in prevalenza della sola stagione invernale):

Per le simulazioni preliminari, relative ai consumi nella stagione invernale, si sono esaminati i seguenti codici di calcolo (in prevalenza si tratta di codici che lavorano in regime stazionario):

- Regime stazionario – metodo di calcolo basato sulle Norme UNI e Dlgs 311/06

- MC IMPIANTO,
- EC501,
- MC4 Software,
- BEES LITE
- PHPPit 2007
- CasaClima
- BESTCLASS
- Docet

- Regime dinamico

- DESIGN BUILDER (motore di calcolo EnergyPlusfunzioni di trasferimento);
- Ecotect (metodo dell'ammittenza).
- TRNSYS (metodo funzione di Trasferimento)

Da uno studio che mette a confronto i principali software per la simulazione energetica degli edifici (F.SCIURPI – C.CARLETTI - F. ASDRUBALI – G.BALDINELLI, 2008), emerge come l'utilizzo di differenti codici di calcolo, nonostante la definizione di precise condizioni al contorno, possa portare ad un'analisi e quindi ad una valutazione dell'efficienza del sistema edificio-impianto differente.

In particolare per i codici di calcolo cosiddetti semplificati, che cioè, pur basandosi su metodi di calcolo ben definiti e normati, prevedono sistema di inserimento dati più semplificato ed immediato, la difficoltà di definire precise condizioni al contorno (Temperatura esterna, irraggiamento, ecc) comporta un significativo scostamento dai dati medi degli altri codici di calcolo (in regime dinamico) sia in termini di dispersioni, di guadagni e di rendimento degli impianti che di fabbisogni energetici, che necessariamente andranno indagati nelle fasi successive della ricerca.

I principali fattori che determinano uno scostamento significativo dei codici che adottano un metodo di calcolo semplificato rispetto al calcolo dinamico, possono essere sintetizzati e individuati nei seguenti punti:

- approssimazione nel calcolo delle superfici finestrate e della tipologia di infisso
- nelle perdite per ventilazione QV i ricambi orari risultano fissati di default ad valore non modificabile,
- gli apporti interni QI non sono definibili dall'utente e si basano su dati di default non chiaramente esplicitati che portano a valori inferiori a quelli degli altri codici di calcolo esaminati;
- per gli apporti solari (QS), il valore del fattore solare g non è chiaramente esplicitato e quindi non è modificabile dall'utente; nel caso specifico di questa ricerca i valori sono risultati inferiori a quelli degli altri codici di calcolo esaminati.

Comunque in funzione dell'obiettivo che ci si pone, è bene individuare lo strumento più adatto, anche perché maggiore è il livello di dettaglio dello strumento, maggiore sarà la competenza richiesta per il suo uso ed il tempo di analisi e, quindi, il costo dello studio energetico.

## 2. Approccio metodologico

Come precedentemente riportato l'utilizzo di una procedura di calcolo semplificata, potrebbe non essere sufficiente a valutare con accuratezza le prestazioni energetiche dell'edificio e degli impianti ad esso asserviti.

Per esempio una procedura stazionaria non consente di valutare, con precisione, un diagramma di durata del carico termico e/o elettrico, necessario a dimensionare un mix impiantistico a servizio di uno o più edifici in generazione distribuita. L'approccio semplificato stazionario consente inoltre una scarsa possibilità di valutare gli aspetti economici degli interventi e le criticità di gestione degli impianti.

D'altra parte lo studio del comportamento energetico dell'edificio in regime dinamico è in generale complesso, dipendente fortemente dal comportamento delle pareti esterne in condizioni di transitorio termico.

L'obiettivo finale della piattaforma ODESSE è la simulazione del distretto energetico, che è definito come un insieme di edifici e impianti (secondo il modello della generazione distribuita), a tale scopo si è dunque deciso di utilizzare per la simulazione dell'elemento base edificio-impianto un approccio semplificato che prevede un modello matematico semplificato<sup>2</sup>, ma essenziale per valutare l'evoluzione termica dell'edificio con la sua dinamica al variare delle condizioni a contorno.

D'altra parte, ODESSE, a differenza della maggior parte dei codici dinamici e stazionari, grazie alla sua struttura facilmente integrabile, consentirà la simulazione di più edifici asserviti da uno stesso mix energetico.

### 2.1 Modello matematico della temperatura interna dell'edificio

E' stata implementata e sviluppata, in ambiente Matlab/simulink, l'equazione differenziale di base che governa la dinamica del modello semplificato dell'edificio (mono zona) di TRNSYS 16, la Type 12: "Energy space heating and cooling load".

L'equazione differenziale, estrapolata dalla Type 12 di TRNSYS, è stata adattata al fine di consentire l'inserimento delle caratteristiche termo fisiche di ciascun elemento dell'involucro edilizio esterno e di ogni sorgente interna. (vedi Cap.5)

Questa caratterizzazione ha consentito di ottenere una formulazione più precisa del comportamento dinamico dell'edificio senza abbandonare l'ausilio di un approccio semplificato.

L'equazione di base estrapolata della Type 12 di TRNSYS è implementata su piattaforma Matlab/simulink è la seguente (vedi Cap. 5 per maggiori dettagli):

$$CAP \frac{dT_r}{dt} = \dot{Q}_{gain} - Disp * (T_R - T_e) \quad (1)$$

dove abbiamo che:

---

<sup>2</sup> In tal modo l'interesse si sposta verso una analisi energetica globale dell'edificio, rappresentato come mono zona.

- CAP : capacità termica dell'edificio (involucro esterno, pareti interne, aria)
- $T_r$  : temperatura interna
- $Q'_{gain}$  : irraggiamento solare
- $T_e$  : temperatura esterna,
- Disp: coefficiente globale di scambio termico per trasmissione e ventilazione

Scrivendo la (1) in forma implicita si ha:

$$dTr/dt+K*Tr=H \quad (2)$$

è stato possibile caratterizzare la dinamica dell'evoluzione termica dell'edificio calcolandone la costante di tempo pari a

$$\tau_0 = 1/K$$

La prima validazione dell'equazione differenziale (1) è stata fatta applicando il modello ODESSE ad un primo caso studio costituito da un edificio di sei piani avente le seguenti caratteristiche

- Superficie utile 1870 mq.
- Disp= 6840 W/K
- CAP =  $1.22 \cdot 10^6$  kJ/kg\*K

Al fine di verificare la rispondenza dinamica del modello matematico con il modello fisico, è stata simulata una risposta a gradino dell'equazione differenziale omogenea:

$$dTr/dt+K*Tr=0$$

Si riporta di seguito il modello dell'equazione differenziale omogenea implementata in Matlab/simulink per testarne la risposta a gradino unitario:

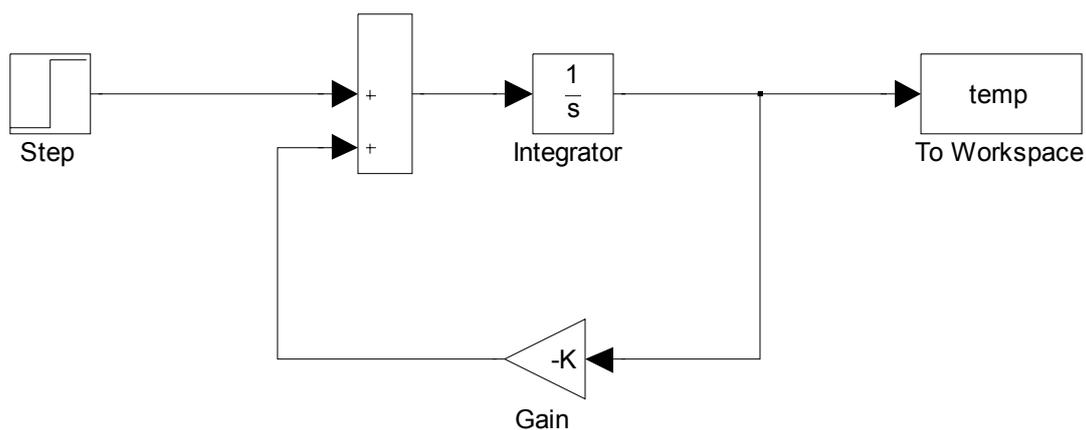


Figura 2.1: schema simulink per lo studio della risposta al gradino

E' stato simulato un periodo pari a 12 giorni con una sollecitazione a gradino all'inizio del secondo giorno.

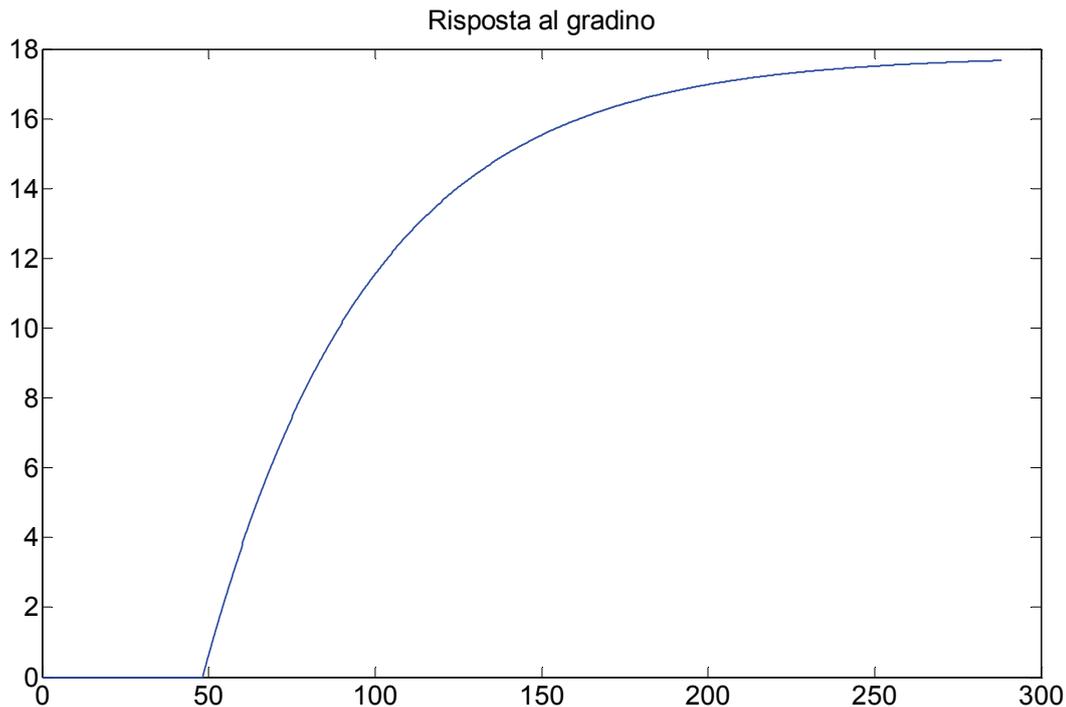


Figura 2.2: risposta al gradino unitario dell'equazione differenziale omogenea

Come si evince dalla figura precedente, la risposta della temperatura interna, alla sollecitazione del gradino unitario, presenta una saturazione al 12° giorno, da cui si deduce un periodo di transitorio pari a circa 10 giorni

Il tempo di riscaldamento del corpo dipende dalla sua costante di tempo,  $\tau_0$ , la cui espressione analitica dipende dalle caratteristiche termo fisiche dell'edificio :

$$\tau_0 = CAP/Disp = 49,4 \text{ ore}$$

Pur considerando l'edificio come mono zona, le pareti interne concorrono pienamente al calcolo della capacità termica, quelle perimetrali esterne vi concorrono relativamente alla posizione dell'isolate come da UNI 10375

Essendo la costante di tempo  $\tau_0 = 49,4$  h allora il transitorio ha bisogno di  $5 \times 49,4 = 247$  h per estinguersi.

Si ottiene in questo modo una coincidenza tra la durata del transitorio simulato con il modello orario e la durata del transitorio ricavata dai parametri termo fisici dell'edificio.

Al fine di validare l'equazione differenziale (1) applicata all'edificio prova, è stato confrontato anche l'andamento dinamico orario della temperatura interna dell'edificio prova con la temperatura interna modellata utilizzando la Type 12 di Trnsys 16, dando ad entrambi i codici uguali condizioni a contorno.

I risultati ottenuti mostrano che i due modelli sono identici:

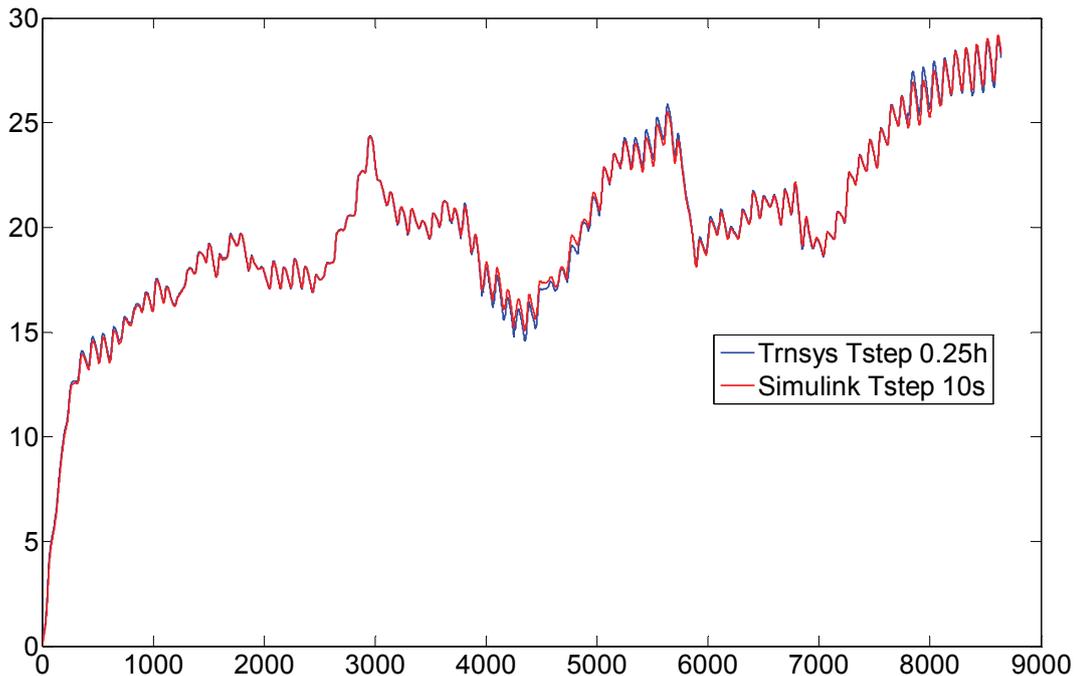


Figura 2.3: Temperatura interna -confronto ODESSE TRNSYS edificio semplificato

Le curve ottenute sono perfettamente sovrapposte. Questo risultato dimostra la validità dell'equazione ricavata dal modello multizona complesso del TRNSYS che è stata implementata nel simulatore.

## 2.2 Calcolo del fabbisogno termico dell'edificio

Facendo riferimento alla Normativa Europea sulla prestazione energetica dell'edificio, il modello di simulazione implementato in ODESSE è stato strutturato in due livelli:

- calcolo dei fabbisogni termici netti di energia per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio;
- calcolo degli indicatori di prestazione energetica globale (energia primaria, emissioni di CO<sub>2</sub>, etc.).

In particolare l'applicazione della Normativa Europea è stata adattata alle condizioni climatiche e alle tipologie costruttive ed impiantistiche locali, analizzando una serie di normative tecniche e strumenti nazionali sviluppati dall'UNI e dal CTI

Per il calcolo del bilancio energetico e delle singole componenti sono state studiate ed applicate le seguenti normative tecniche:

- UNI/TS 11300-1 definisce le linee guida per l'applicazione nazionale della Norma UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile quasi stazionario per il calcolo dei fabbisogni netti di energia per riscaldamento e per raffrescamento;

- UNI TS 11300 prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2-1: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria nel caso di utilizzo dei combustibili fossili;
- UNI EN ISO 13786: Prestazione termica dei componenti per l'edilizia: caratteristiche termiche dinamiche – metodo di calcolo.
- UNI EN ISO 10375: Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti
- ASHARE -Fundamental Handbook 2001

Prima che venisse pubblicata la Norma UNI TS 11300 parte 1 è stata esaminata la Raccomandazione del CTI R03, utilizzata per semplificare la degli input di calcolo al modello matematico.

La procedura di calcolo delle UNI TS 11300 prevede due equazione del bilancio energetico per il riscaldamento e raffrescamento, così espresse :

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \mu_1 * Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (1)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \mu_2 * Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

Dove:

- dove  $Q_{H/C,nd}$  è il fabbisogno netto di energia dell'edificio per riscaldamento/raffrescamento;
- $Q_{H/C,ht}$  è lo scambio termico totale nel caso di riscaldamento/raffrescamento;
- $Q_{H/C,tr}$  è lo scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento/raffrescamento;
- $Q_{H/C,ve}$  è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento/raffrescamento;
- $Q_{gn}$  sono gli apporti termici totali;  $Q_{int}$  sono gli apporti termici interni;
- $Q_{sol}$  sono gli apporti termici solari;
- $\mu$ : fattore di utilizzazione

La UNI TS 11300 /1, introduce nel calcolo del bilancio energetico un fattore di utilizzazione per le dispersioni termiche e per gli apporti interni e solari, il cui effetto è quello di considerare che solo una parte delle perdite per trasmissione e ventilazione risulta utile ai fini della riduzione del carico estivo, e che solo una parte del guadagno termico risulta utili alla riduzione del carico invernale.

La quota delle perdite o dei guadagni non utilizzabile è quella che si manifesta in periodi nei quali non ha effetti ai fini del miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio.

Tali coefficienti di utilizzazione non sono stati introdotti all'interno del modello matematico di ODESSE, in quanto esso, utilizza un algoritmo più complesso e completo che consente di determinare in maniera più esatta il fabbisogno energetico invernale ed estivo e contemporaneamente di verificare le performance dell'impianto di riscaldamento e/o raffreddamento (vedi. Cap.5).

Infatti il bilancio energetico viene calcolato ad intervalli di tempo orari, (1 ora) descrivendo in regime variabile le dispersioni termiche attraverso gli elementi dell'edificio , il flusso termico dovuto alla ventilazione negli ambienti, l'accumulo termico delle strutture interne, i carichi interni e quelli dovuti alla radiazione solare.

Per la valutazione degli indici prestazionali, sono stati esaminati inoltre il Dlgs 192/05 e il successivo Dlgs 311/06 i quali stabiliscono che l'edificio debba essere caratterizzato da un fabbisogno energetico annuo per la climatizzazione invernale inferiore ad un valore prefissato (EPI<sub>lim</sub>) (Allegato C - Paragrafo 1). Tali valori vengono calcolati in funzione di:

1. Condizioni climatiche della località (zona climatica e gradi giorno);
2. Coefficiente di forma dell'edificio (rapporto tra superficie disperdente e volume lordo riscaldato, espresso in S/V); riportano

L'indice di prestazione energetica EPI indica il fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale normalizzato rispetto a:

- Superficie utile riscaldata e quindi espresso come kWh/m<sup>2</sup>\*a, nel caso di edifici residenziali (cat. E1) esclusi collegi, caserme e case di pena
- Volume lordo dell'edificio per tutte le altre categorie e quindi espresso come kWh/m<sup>3</sup>\*a

Come specificato nel dettaglio nei paragrafi successivi, ODESSE fornisce il valore di Epi dell'edificio simulato corrispondente al periodo di riscaldamento.

Al fine di effettuare un confronto tra il fabbisogno energetico normalizzato Epi e il relativo valore Epi<sub>lim</sub> dell'edificio, è stata implementata nel pre-processore la seguente tabella come indicata dal Dlgs 192/05, riportante il valore di EPI<sub>lim</sub>:

| Zona climatica |        |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|--------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | A      | B   |      | C    |      | D    |      | E    |      | F    |
| S/V            | <600gg | 601 | 900  | 901  | 1400 | 1401 | 2100 | 2101 | 3000 | 3000 |
| <0.2           | 8,5    | 8,5 | 12,8 | 12,8 | 21,3 | 21,3 | 34   | 34   | 46,8 | 46,8 |
| >0.9           | 36     | 36  | 48   | 48   | 68   | 68   | 88   | 88   | 116  | 116  |

Tabella 2.1: Epi<sub>lim</sub> per edifici residenziali

Il Dlgs 192/05 fornisce anche i limiti relativi alle trasmittanze limite (U<sub>lim</sub>) delle chiusure opache e trasparenti indicate in Allegato C, in funzione della zona climatica [W/mq\*K]:

| Zona climatica | Dal 1 /1/2010 |
|----------------|---------------|
| A              | 0,62          |
| B              | 0,48          |
| C              | 0,40          |
| D              | 0,36          |
| E              | 0,34          |
| F              | 0,33          |

Tabella 2.2: Strutture verticali opache: Trasmittanza limite [W/m<sup>2</sup>K]

| Zona climatica | Dal 1 /1/2010 |
|----------------|---------------|
| A              | 0,38          |

|   |      |
|---|------|
| B | 0,38 |
| C | 0,38 |
| D | 0,32 |
| E | 0,30 |
| F | 0,29 |

Tabella 2.3: Strutture orizzontali opache (coperture): Trasmittanza limite [W/m<sup>2</sup>K]

| Zona climatica | Dal 1 /1/2010 |
|----------------|---------------|
| A              | 0,65          |
| B              | 0,49          |
| C              | 0,42          |
| D              | 0,36          |
| E              | 0,33          |
| F              | 0,32          |

Tabella 2.4: Strutture orizzontali opache (pavimenti): Trasmittanza limite [W/m<sup>2</sup>K]

| Zona climatica | Dal 1 /1/2010 |
|----------------|---------------|
| A              | 4,6           |
| B              | 3,0           |
| C              | 2,6           |
| D              | 2,4           |
| E              | 2,2           |
| F              | 2,0           |

Tabella 2.5 Chiusure trasparenti compresi infissi: Trasmittanza limite [W/m<sup>2</sup>K]

In conformità ai limiti di trasmittanza sopra indicati, ODESSE fornisce un messaggio di allerta, se i materiali scelti dall'utente per costruire i pacchetti murari e gli infissi dell'involucro edilizio non garantiscono valori di trasmittanza inferiori a quelli indicati dal Dlgs 192/05.

### 2.3 Calcolo dei consumi elettrici dell'edificio

La piattaforma ODESSE consente di definire anche i consumi elettrici (escluso climatizzazione) medi annui dell'edificio simulato, partendo da diagrammi di carico orari misurati su edifici tipo a Nord Sud e Centro Italia.

I profili di utenza elettrica relativi a edifici residenziali sono stati estrapolati da uno studio compiuto dal CESI (2005), che ha avuto come oggetto la definizione di un modello di carico elettrico e termico d'utenza civile.

Si riportano di seguito i diagrammi del carico elettrico orario, per edificio come elaborati dal CESI:

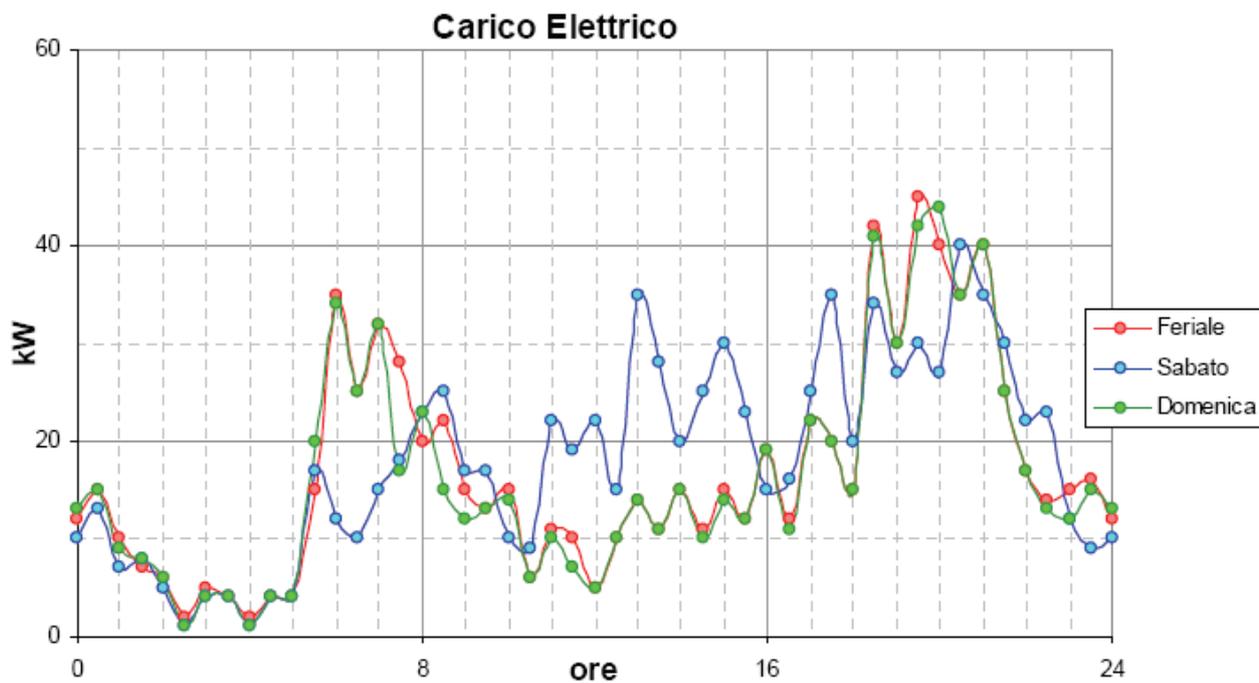


Figura 2.4: Carico elettrico (escluso il condizionamento estivo) tipico di un'utenza residenziale del CENTRO Italia (40 appartamenti)

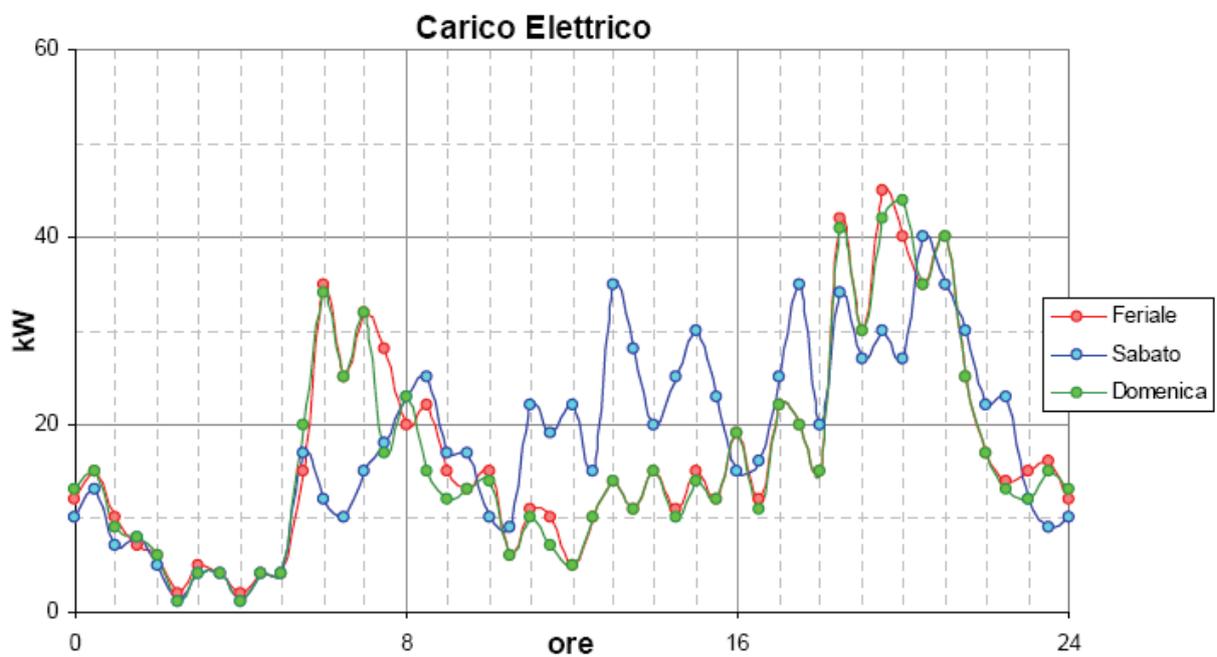


Figura . 5: Carico elettrico (escluso il condizionamento estivo) tipico di un'utenza residenziale del NORD Italia (40 appartamenti)

Il carico elettrico orario è stato normalizzato in funzione della superficie utile, il cui valore è definito dall'utente utilizzando un'apposita interfaccia.

### 3. Interfaccia ODESSE

Per effettuare il passaggio dei dati e dei parametri, che caratterizzano l'edificio e per effettuare i calcoli di verifica del rispetto delle normative, è stato necessario costruire un'interfaccia utente. Essa provvede a soddisfare due vincoli, spesso contrastanti fra loro: è semplice da utilizzare per l'utente, ma allo stesso tempo è completa dal punto di vista dei parametri elaborati. Questi dati permettono la caratterizzazione dell'edificio e degli impianti.

L'interfaccia è stata sviluppata in linguaggio *Java*, ciò la rende multiplatforma: in pratica funziona su qualsiasi calcolatore a prescindere dal sistema operativo utilizzato.

I dati immessi possono essere verificati ed eventualmente corretti per mezzo di una prima scheda riepilogativa, prima di essere elaborati dal modello dell'edificio per mezzo di una simulazione dinamica la cui durata temporale (in termini di giorni simulati) può essere decisa dall'utente.

La procedura che l'utente deve eseguire può essere schematizzata attraverso il seguente diagramma di flusso:

1. dati input immissione dati
2. validazione risultati prodotti dal preprocessore (che elabora i parametri del modello in base ai dati di input)
3. attivazione della simulazione

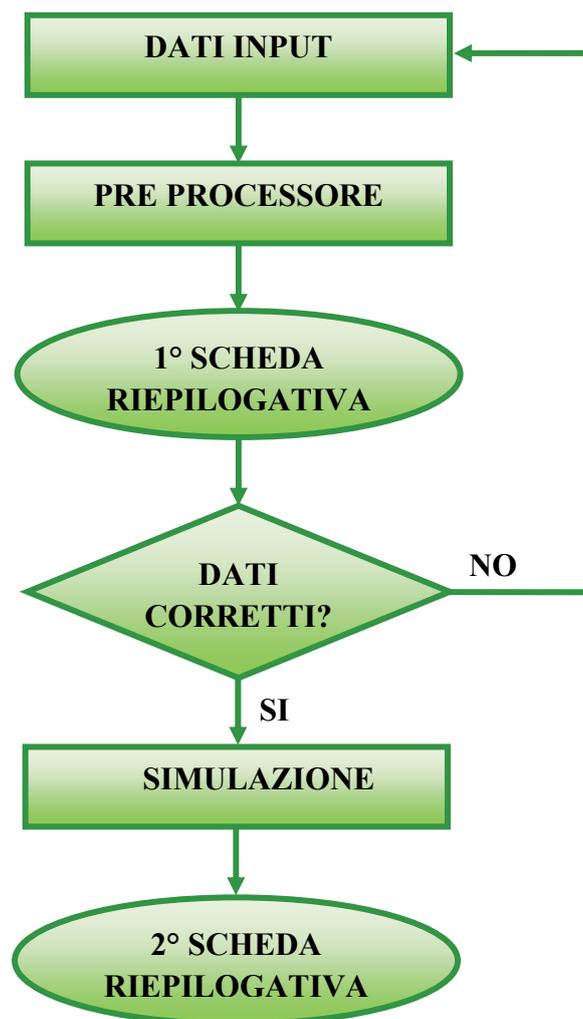


Figura 3.1 – Diagramma di flusso

I risultati prodotti dalla simulazione vengono presentati attraverso una seconda scheda riepilogativa e se non corrispondono alle richieste dell'utente è necessario modificare alcuni dei parametri di input e procedere nuovamente alla simulazione. È dunque possibile arrivare alla definizione dell'architettura ottimale del sistema edificio-impianto attraverso una serie di valutazioni successive.

È anche possibile salvare i dati di un particolare progetto, o caricarne uno già salvato o di quelli che costituiscono il benchmark con cui è stato testato il software.

Anche i risultati della simulazione come i carichi termici invernale ed estivo (valori orari o cumulati annui), le temperature interna (della stanza) ed esterna (ambientale), EP dell'edificio, ecc.. possono essere salvati, sia in forma tabellare che grafica.

L'interfaccia è costituita da diverse pagine (o tab). Queste sono suddivise in base alla tipologia di dati che vengono impostati. Tali categorie sono: "Dati Generali", "Chiusure verticali", "Chiusure orizzontali", "Ponti Termici" e "Impianti".

### 3.1 Dati Generali

Nella figura seguente viene visualizzata la prima schermata, quella dei "Dati Generali". Attraverso di essa è possibile immettere i valori riguardanti la locazione geografica dell'edificio, le caratteristiche generali di questo, e caratterizzare i parametri di comfort.

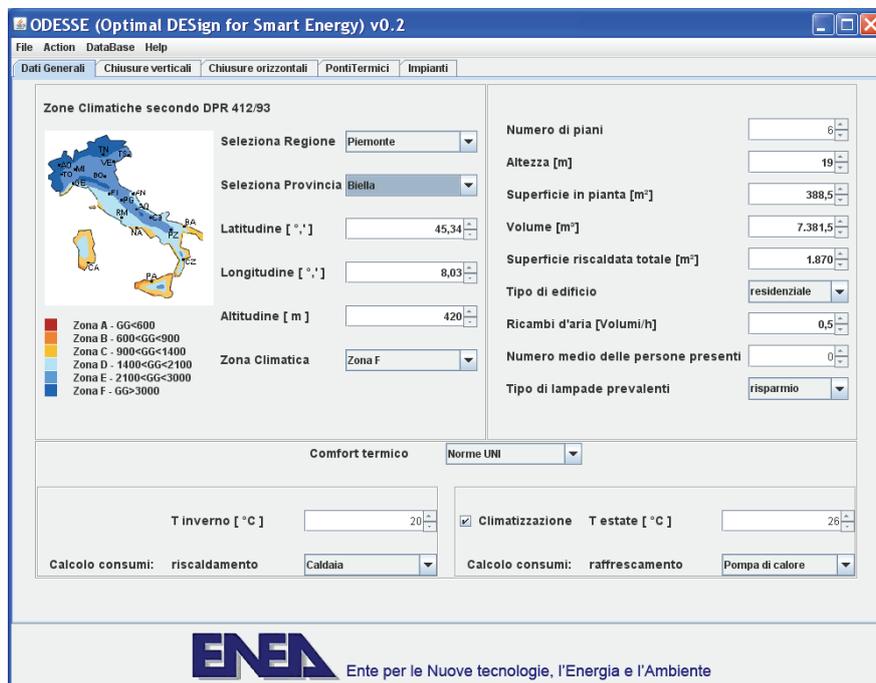


Figura 3.2 – Pagina dell'interfaccia relativa ai dati generali

Con locazione geografica dell'edificio si intendono in particolare: regione, provincia e coordinate geografiche (latitudine, longitudine e altitudine) e corrispondentemente zona climatica.

Questi parametri sono necessari per caratterizzare i dati meteo elaborati attraverso il modulo NWG (Neural Weather Generator) che sarà descritto nel capitolo 4, e per determinare i periodi invernale ed estivo che determinano i periodi di accensione degli impianti.

I parametri generali dell'edificio sono: numero piani, altezza, superficie in pianta, volume (caratterizzato in prima approssimazione da altezza moltiplicata per la superficie in pianta, ma ovviamente modificabile), tipo di edificio (residenziale o terziario), ricambi d'aria (in volumi/ora), numero medio delle persone presenti e tipo di lampade prevalenti (a risparmio o incandescenza). Tutti questi parametri sono necessari per il calcolo dei carichi termici dell'edificio. Ad esempio le lampade ed il numero delle persone sono necessari per calcolare gli apporti termici.

Il comfort termico può essere descritto tramite i limiti delle normative UNI, per cui le temperatura interne estive ed invernali devono mantenersi a 26 e 20 °C rispettivamente, con una isteresi di  $\pm 2$  °C. Vengono immessi in questa parte anche i tipi di impianti prevalenti per il calcolo dei consumi. Questi andranno tolti quando verranno effettivamente inseriti gli impianti nel simulatore, ed andranno determinati tramite la scheda apposita.

### 3.2 Chiusure verticali e Chiusure orizzontali

Dopo la prima schermata si può passare a caratterizzare la struttura dell'edificio attraverso le schede "Chiusure verticali" e "Chiusure orizzontali".

Da queste è possibile impostare i parametri delle giaciture, ossia il particolare valore di inclinazione e azimut, e il numero delle pareti (solo per le chiusure verticali) per quel particolare orientamento. Dopo di che per ogni giacitura si può selezionare il numero delle pareti presenti e passare a configurarle, premendo il pulsante configura.

Nelle chiusure orizzontali i valori di inclinazione e azimut sono posti a zero per il solaio terreno e per quelli intermedi. L'unica tipologia di solaio in cui tali parametri possono essere modificati è quella di copertura.

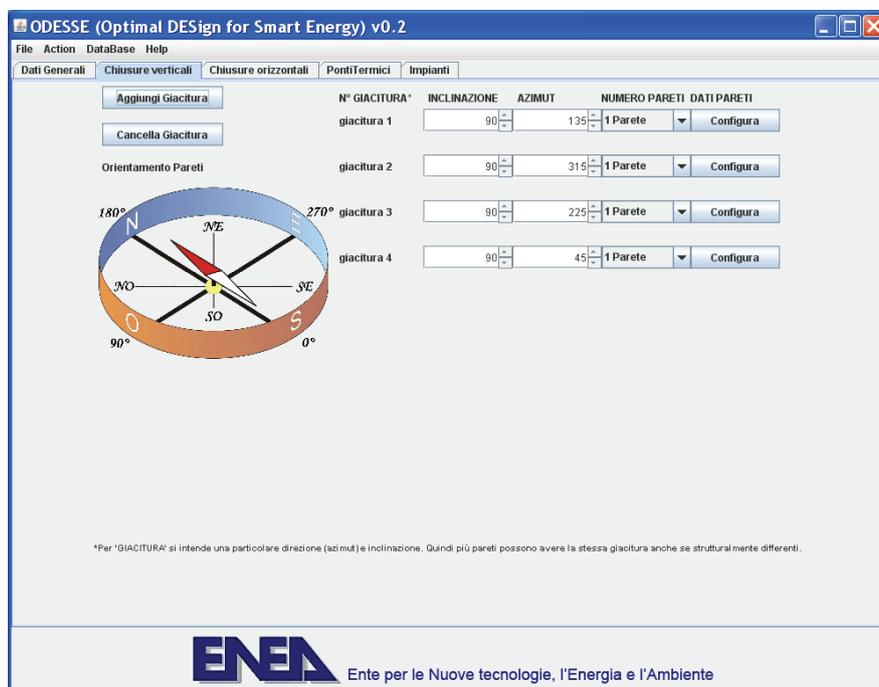


Figura 3.3 – Pagina dell'interfaccia relativa alle chiusure verticali

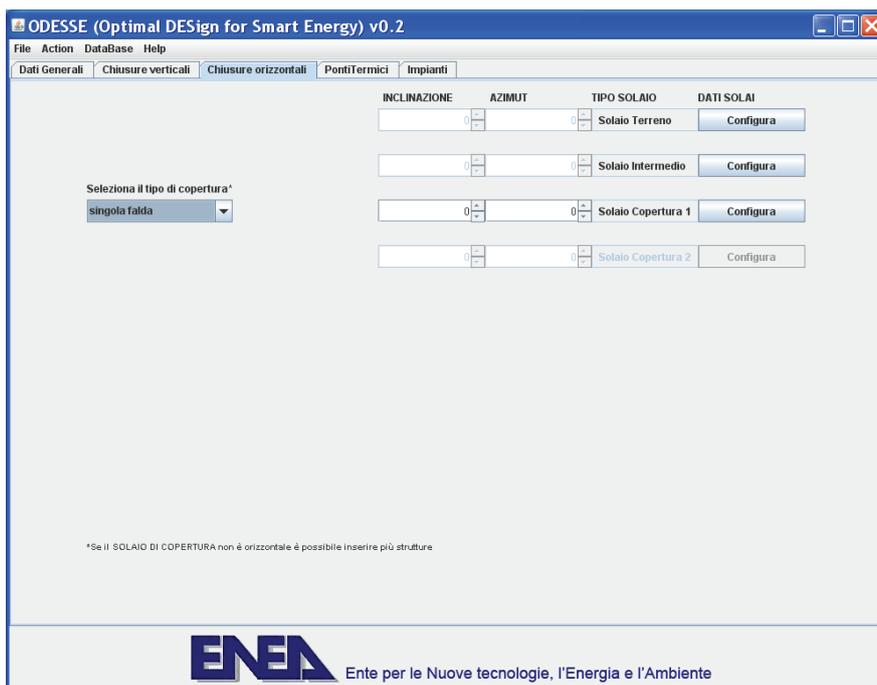


Figura 3.4 – Pagina dell'interfaccia relativa alle chiusure orizzontali

Una volta premuto il pulsante configura si apre la finestra di dialogo da cui è possibile passare a configurare le pareti.

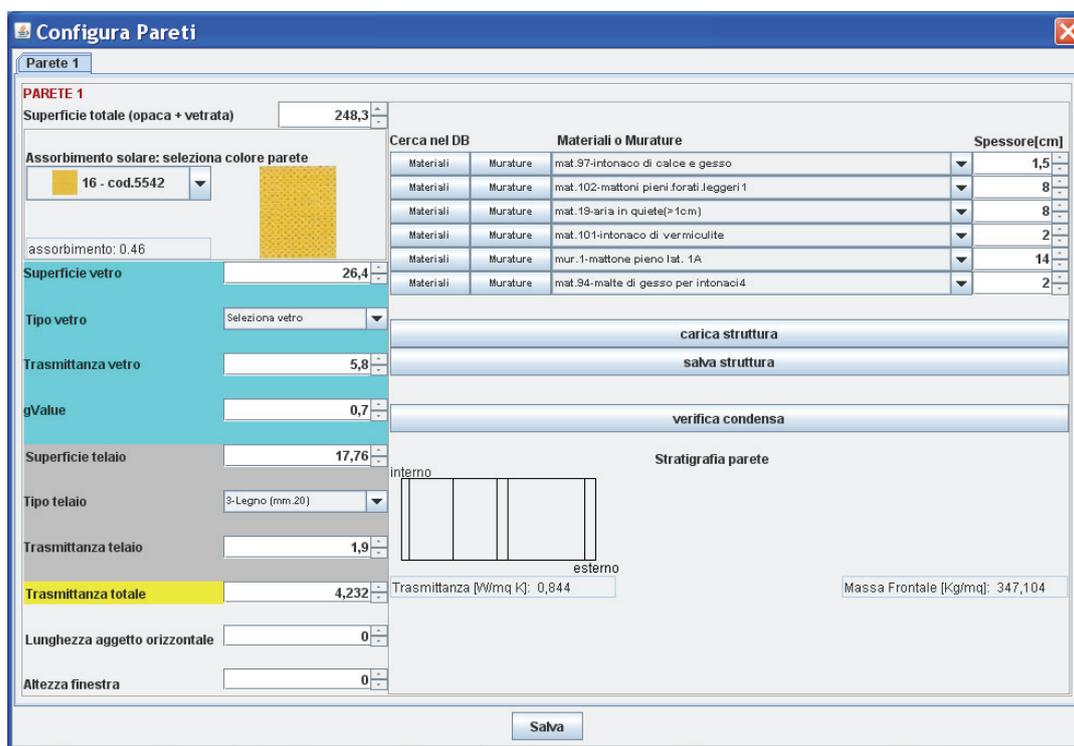


Figura 3.5 – Pagina dell'interfaccia relativa alla configurazione della parete

In particolare vengono impostati la superficie totale e quella dell'infisso (vetro e telaio), il colore della parete (con il corrispettivo valore di assorbimento), le tipologie di vetro e telaio per calcolare la trasmittanza totale.

Viene inoltre impostata la stratigrafia della parete facendo ricorso ad un database implementato in SQLite e costruito sulla base delle normative di riferimento UNI 10351e UNI 10355 rispettivamente per quanto riguarda i materiali e le murature.

E' possibile ampliare tale database con nuove tipologie di murature e materiali innovativi e ecocompatibili. E' altresì possibile salvare una particolare stratigrafia e caricarla su eventuali altre pareti. In ogni caso il database verrà descritto nel paragrafo seguente.

Mentre si determinano le pareti con le murature, i materiali e i relativi spessori, vengono calcolate in contemporanea la trasmittanza e la massa frontale per verificare eventualmente che si rispettino i limiti imposti dalle normative e vengono anche visualizzati gli spessori dei vari materiali dallo strato interno a quello più esterno tramite un diagramma grafico. Il database può essere consultato impostando delle query in base ai valori dei parametri che li contraddistinguono.

La massa frontale di ogni parete verticale o orizzontale è calcolata dal preprocessore tramite la seguente formula generalizzata:

$$mf = \sum_{i=1}^n \rho_i * s_i$$

con mf massa frontale della parete e  $\rho_i$  ed  $s_i$  rispettivamente densità e spessore del materiale dello strato imo.

La trasmittanza di ogni parete verticale o orizzontale è calcolata dal preprocessore tramite la seguente formula generalizzata, ricavata dallo studio delle normative UNI EN ISO 6946, UNI/TS 11300-1 (App. A):

$$\tau = 1 / \left( (k1/h_i) + (coeff0/C0) + (coeff1/C1) + (coeff2/C2) + (k2/h_e) + \sum_{i=1}^n (s_i/\lambda_i) \right)$$

con  $\tau$  trasmittanza (inverso della resistenza termica),  $\lambda_i$  ed  $s_i$  rispettivamente conduttività e spessore del materiale dello strato imo,  $h_i = 1/0.107$  e  $h_e = 1/0.043$  per chiusure orizzontali e  $h_i = 1/0.123$  e  $h_e = 1/0.043$  per chiusure verticali; C è la conduttanza dell'intercapedine d'aria e si hanno i seguenti valori: C0 = 6.98, C1 = 6.4, C2 = 7.56, i cui coefficienti variano in base al tipo di chiusura, come descritto di seguito.

I coefficienti coeff0, coeff1, coeff2 vengono inizializzati a 0 per tutti i tipi di chiusure, mentre k1 e k2 vengono inizializzate come segue:

se solaio copertura: k1=1; k2=1;  
 se solaio intermedio: k1=2; k2=0;  
 se solaio intermedio: k1=1; k2=0 o 1 a seconda che sia su pilotis o no;  
 se parete verticale: k1=1; k2=1;

e variano con il seguente algoritmo:

se lo strato è quello con l'aria ma è  $\leq 1$ cm coeff2 viene aumentato di 1 e  $s_i/\lambda_i$  dello strato è 0.

se lo strato è quello con l'aria ma è  $> 1$ cm coeff0 o coeff1 viene aumentato di 1 rispettivamente se chiusure si tratta di chiusure orizzontali o verticali, e  $s_i/\lambda_i$  dello strato è 0 ed inoltre se lo spessore è maggiore di 6cm k1 viene aumentato di 2 (in pratica vengono aggiunti  $(1/h_i)+(1/h_i)$  per lo strato interno).

| Codice | Nome                 | Descrizione   | Conductivita [W/m²K] | Densita [kg/m³] | δ [kg/m³*s*...] |
|--------|----------------------|---|----------------------|-----------------|-----------------|
| 20     | cls1 aggr. naturali  | calcestruzzo con aggregati naturali (a struttura chiusa)              | 1.16                 | 2000.0          | 0.88            |
| 21     | cls2 aggr. naturali  | calcestruzzo con aggregati naturali (a struttura chiusa)              | 1.48                 | 2200.0          | 0.88            |
| 22     | cls3 aggr. naturali  | calcestruzzo con aggregati naturali (a struttura chiusa)              | 1.91                 | 2400.0          | 0.92            |
| 23     | cls1 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.31                 | 1000.0          | 0.88            |
| 24     | cls2 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.35                 | 1100.0          | 0.88            |
| 25     | cls3 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.39                 | 1200.0          | 0.88            |
| 26     | cls4 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.44                 | 1300.0          | 0.88            |
| 27     | cls5 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.5                  | 1400.0          | 0.88            |
| 28     | cls6 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.57                 | 1500.0          | 0.88            |
| 29     | cls7 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.65                 | 1600.0          | 0.88            |
| 30     | cls8 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura chiusa)                  | 0.75                 | 1700.0          | 0.88            |
| 31     | cls1 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta)                  | 0.16                 | 500.0           | 0.88            |
| 32     | cls2 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta)                  | 0.18                 | 600.0           | 0.88            |
| 33     | cls3 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta)                  | 0.21                 | 700.0           | 0.88            |
| 34     | cls4 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta)                  | 0.24                 | 800.0           | 0.88            |
| 35     | cls5 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta)                  | 0.27                 | 900.0           | 0.88            |
| 36     | cls6 arg. espanse    | calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta)                  | 0.31                 | 1000.0          | 0.88            |
| 37     | cls1 cell. autoclave | calcestruzzo cellulare da autoclave (a struttura aperta)              | 0.15                 | 400.0           | 0.88            |
| 38     | cls2 cell. autoclave | calcestruzzo cellulare da autoclave (a struttura aperta)              | 0.17                 | 500.0           | 0.88            |
| 39     | cls3 cell. autoclave | calcestruzzo cellulare da autoclave (a struttura aperta)              | 0.19                 | 600.0           | 0.88            |
| 40     | cls4 cell. autoclave | calcestruzzo cellulare da autoclave (a struttura aperta)              | 0.22                 | 700.0           | 0.88            |
| 41     | cls5 cell. autoclave | calcestruzzo cellulare da autoclave (a struttura aperta)              | 0.25                 | 800.0           | 0.88            |
| 42     | cls1 vulcanica       | calcestruzzo di inerti espansi di orig. vulcanica(a struttura aperta) | 0.38                 | 1000.0          | 0.88            |
| 43     | cls2 vulcanica       | calcestruzzo di inerti espansi di orig. vulcanica(a struttura aperta) | 0.47                 | 1200.0          | 0.88            |
| 44     | cls3 vulcanica       | calcestruzzo di inerti espansi di orig. vulcanica(a struttura aperta) | 0.60                 | 1400.0          | 0.88            |

Cerca per Tipologia: calcestruzzo      Cerca per Conductivita: tutti i valori      Cerca per Densita: tutti i valori

| Codice | Nome                      | Descrizione                                   | Spessore [mm] | Massa Volumica [Kg/m³] | Massa Superficiale [Kg/m²] | Resistenza Termica [m²K/W] | Cs [KJ/Kg*K] | δ [kg/m³*s*...] |
|--------|---------------------------|---|---------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|
| 1      | mattono pieno lat. 1A     | strutture verticali con elementi di laterizio | 140.0         | 1800.0                 | 252.0                      | 0.18                       | 1.0          | 23.44           |
| 2      | mattono pieno lat. 1B     | strutture verticali con elementi di laterizio | 280.0         | 1800.0                 | 504.0                      | 0.36                       | 1.0          | 23.44           |
| 3      | mattono pieno lat. 1C     | strutture verticali con elementi di laterizio | 425.0         | 1800.0                 | 765.0                      | 0.54                       | 1.0          | 23.44           |
| 4      | mattono pieno lat. 2A     | strutture verticali con elementi di laterizio | 120.0         | 1800.0                 | 216.0                      | 0.15                       | 1.0          | 23.44           |
| 5      | mattono pieno lat. 2B     | strutture verticali con elementi di laterizio | 250.0         | 1800.0                 | 450.0                      | 0.32                       | 1.0          | 23.44           |
| 6      | mattono pieno lat. 2C     | strutture verticali con elementi di laterizio | 375.0         | 1800.0                 | 675.0                      | 0.47                       | 1.0          | 23.44           |
| 7      | mattono semipieno lat. 1A | strutture verticali con elementi di laterizio | 120.0         | 1800.0                 | 181.0                      | 0.19                       | 1.0          | 31.25           |
| 8      | mattono semipieno lat. 1B | strutture verticali con elementi di laterizio | 250.0         | 1800.0                 | 379.0                      | 0.37                       | 1.0          | 31.25           |
| 9      | mattono semipieno lat. 2A | strutture verticali con elementi di laterizio | 120.0         | 1800.0                 | 140.0                      | 0.24                       | 1.0          | 31.25           |
| 10     | mattono semipieno lat. 2B | strutture verticali con elementi di laterizio | 250.0         | 1800.0                 | 297.0                      | 0.47                       | 1.0          | 31.25           |
| 11     | mattono semipieno lat. 3A | strutture verticali con elementi di laterizio | 140.0         | 1800.0                 | 192.0                      | 0.24                       | 1.0          | 31.25           |
| 12     | mattono semipieno lat. 3B | strutture verticali con elementi di laterizio | 280.0         | 1800.0                 | 385.0                      | 0.46                       | 1.0          | 31.25           |
| 13     | blocco semipieno lat. 1   | strutture verticali con elementi di laterizio | 350.0         | 1400.0                 | 306.0                      | 1.05                       | 1.0          | 31.25           |
| 14     | blocco semipieno lat. 2   | strutture verticali con elementi di laterizio | 200.0         | 1400.0                 | 164.0                      | 0.47                       | 1.0          | 31.25           |
| 15     | blocco semipieno lat. 3A  | strutture verticali con elementi di laterizio | 300.0         | 1400.0                 | 260.0                      | 0.77                       | 1.0          | 31.25           |
| 16     | blocco semipieno lat. 3B  | strutture verticali con elementi di laterizio | 300.0         | 1400.0                 | 232.0                      | 0.85                       | 1.0          | 31.25           |
| 17     | blocco semipieno lat. 4   | strutture verticali con elementi di laterizio | 300.0         | 1400.0                 | 241.0                      | 0.89                       | 1.0          | 31.25           |
| 18     | blocco semipieno lat. 5   | strutture verticali con elementi di laterizio | 450.0         | 1400.0                 | 419.0                      | 1.44                       | 1.0          | 31.25           |
| 19     | blocco forato lat. 1      | strutture verticali con elementi di laterizio | 150.0         | 1800.0                 | 114.0                      | 0.45                       | 1.0          | 37.25           |
| 20     | blocco semipieno lat. 6   | strutture verticali con elementi di laterizio | 400.0         | 1400.0                 | 322.0                      | 1.19                       | 1.0          | 31.25           |
| 21     | blocco forato lat. 2A     | strutture verticali con elementi di laterizio | 250.0         | 1400.0                 | 199.0                      | 0.8                        | 1.0          | 37.25           |
| 22     | blocco forato lat. 2B     | strutture verticali con elementi di laterizio | 250.0         | 1400.0                 | 180.0                      | 0.83                       | 1.0          | 37.25           |
| 23     | blocco forato lat. 3      | strutture verticali con elementi di laterizio | 300.0         | 1400.0                 | 208.0                      | 0.94                       | 1.0          | 37.25           |
| 24     | blocco forato lat. 4      | strutture verticali con elementi di laterizio | 200.0         | 1800.0                 | 153.0                      | 0.6                        | 1.0          | 37.25           |
| 25     | blocco forato lat. 5      | strutture verticali con elementi di laterizio | 250.0         | 1800.0                 | 192.0                      | 0.72                       | 1.0          | 37.25           |

Cerca per Tipologia: tutte le tipologie      Cerca per Spessore: tutti i valori      Cerca per Massa Volumica: tutti i valori      Cerca per Massa Superficiale: tutti i valori      Cerca per Resistenza Termica: tutti i valori

Figura 3.6 – Database dei materiale e delle murature

Un altro vincolo da verificare è quello igrometrico. Premendo il pulsante ‘verifica condensa’ viene visualizzata la finestra di dialogo attraverso la quale si può verificare per ogni mese, attraverso il diagramma di Glaser il formarsi della condensa interstiziale.

In pratica vengono presi i valori di riferimento di pressione parziale e temperatura media mensile della località più vicina come riportati nella norma UNI 10349. E’ possibile anche variare tali valori in caso se ne abbiano a disposizione altri più precisi. Dopo di che vengono effettuati i calcoli in base a quanto riportato nella norma UNI EN ISO 13788.

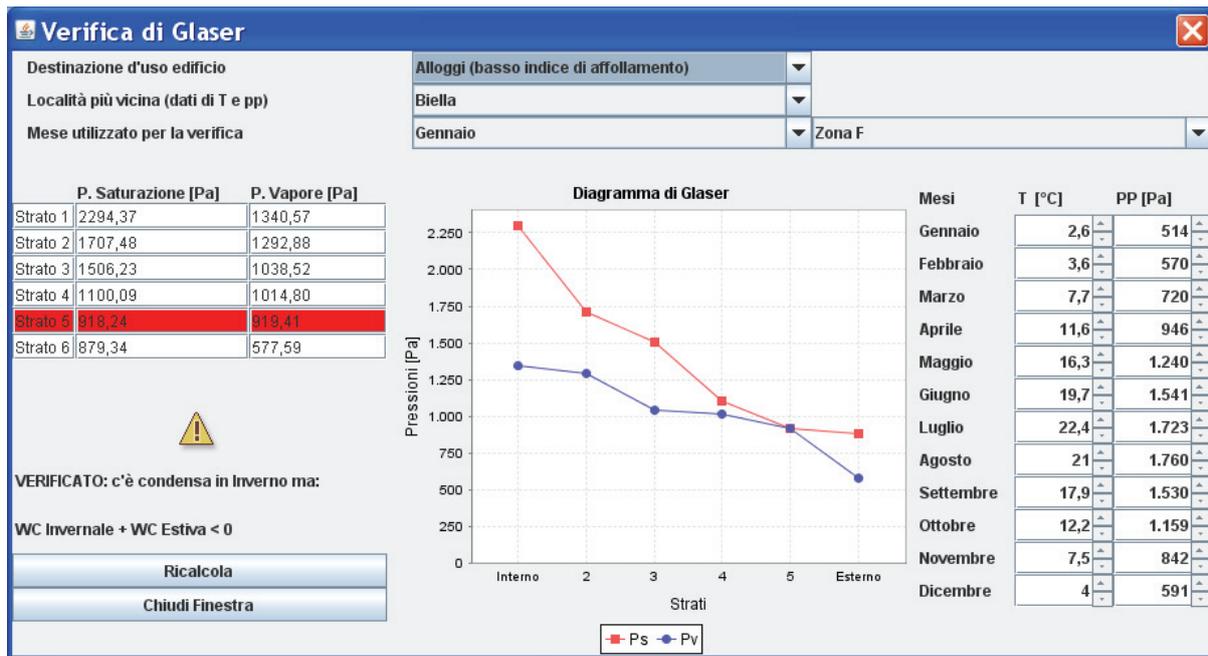


Figura 3.7 – Verifica del vincolo igrometrico

Dalla pressione esterna viene calcolata quella interna sommando un  $\Delta p$ . Tale valore varia in base alla destinazione d'uso dell'edificio e alla temperatura media mensile dell'aria esterna:

$$p_i = p_e + \Delta p$$

Dopo di che vengono calcolati:

- il flusso termico specifico  $q$  in base alla trasmittanza  $\tau$  della parete e alla differenza di temperatura  $\Delta\Theta = t_i - t_e$ :  $q = \tau * \Delta\Theta$ ;
- la resistenza alla diffusione del vapore:  $z = \sum_{\text{strati}} \text{spessore} / \mu$ ;
- il trasporto dell'umidità:  $g_v = (p_{v_i} - p_{v_e}) / z$ ;
- la temperatura dello strato  $n$ -mo:  $\Theta_n = \Theta_i - ( \sum_0^{\text{strato}} R_n ) * q$  con  $R_j$  resistenza termica dello strato  $j$ ;

ed infine si può calcolare la pressione di saturazione e la pressione di vapore per ogni strato:

$$P_{\text{sat}}(n) = \exp(65.81 - 7066.27 / (\Theta_n + 273.15) - 5.976 * \log(\Theta_n + 273.15))$$

$$P_{\text{vap}}(n) = P_{\text{vap}}(n-1) - (g * z)$$

Per il mese e lo strato considerato si ha condensa quando  $P_{\text{sat}}(n) < P_{\text{vap}}(n)$ .

Viene quindi calcolata la condensa invernale durante i mesi di riscaldamento (determinando la quantità di condensa accumulata:  $W_c$  Invernale) e la condensa estiva in maniera analoga (determinando la quantità di condensa evaporata:  $W_c$  Estiva). Prendendo poi la quantità limite di condensa ammissibile ( $W_{Amm}$ ) alla fine del periodo di condensazione che dipende dai materiali (in ogni caso non può superare i  $500 \text{ g/m}^2$ ), si può effettuare la verifica di Glaser secondo il seguente algoritmo:

Se c'è almeno 1 strato con condensa:

$$\text{Se}((W_C \text{ Invernale} + W_C \text{ Estiva}) < 0)$$

c'è condensa in Inverno ma evapora in estate

Altrimenti

$$\text{Se}(W_C \text{ Invernale} < W_{Amm} \ \&\& \ W_C \text{ Estiva} > 0)$$

$W_C \text{ Invernale} < W_{Amm}$  ma anche la  $W_C \text{ Estiva} > 0$  : VERIFICA PARZIALE

Altrimenti

$$\text{Se}(W_C \text{ Invernale} < W_{Amm})$$

condensa sotto il limite

Altrimenti

c'è condensa.

### 3.3 DataBase

Il calcolo dei carichi termici estivo ed invernale prevede la conoscenza dello stato dell'arte dell'edificio per il quale si intende indagare i consumi. Tale obiettivo sarebbe perseguibile se si conoscessero la natura e le caratteristiche termo fisiche dei materiali che concorrono alla definizione delle diverse strutture costituenti un edificio, vale a dire, strutture opache orizzontali e verticali, strutture trasparenti e ponti termici.

Da qui nasce l'esigenza di avere sviluppato un data base, cioè un archivio strutturato in modo tale da consentire la gestione dei dati stessi (l'inserimento, la ricerca, l'aggiornamento).

L'insieme dei dati risulta elaborato e suddiviso nel rispetto della parte di normativa italiana considerata.

In particolare la norma UNI 10351 è stata presa in considerazione per la definizione dei valori di conducibilità termica perché riferita ad elementi costruttivi omogenei, ovvero a quelle costruzioni costituite da strati continui di materiali omogenei ed isotropi e nei quali lo scambio termico avviene solo per conduzione. La parte di data base che contiene l'elenco dei materiali suddetti è stata strutturata in modo da fornire per ognuno di essi la descrizione e le caratteristiche di conduttività, densità e permeabilità al vapore (come si evince in fig. 3.6a).

Si è invece tenuto conto della norma UNI 10355, prima norma italiana che stabilisce il criterio di determinazione dei valori di resistenza termica per diverse tipologie di murature e di solai, per gli elementi costruttivi non omogenei, ovvero per le murature costituite da strati di materiali cellulari, granulari, fibrosi o porosi e nei quali lo scambio termico è determinato dall'effetto combinato di radiazione e convezione. L'elenco delle strutture verticali ed orizzontali relative alle tipologie summenzionate è strutturato in modo da fornire per ciascuna di esse la descrizione, lo spessore e le caratteristiche di massa volumica e resistenza termica (come si evince in fig. 3.6b).

Il data base comprende inoltre delle strutture murarie tipiche utilizzate nell'edilizia italiana. Tali strutture e le relative caratteristiche costruttive derivano dagli abachi che le raccomandazioni CTI 003/03 e le UNI TS 11300 hanno indicato come frequentemente riscontrabili durante la fase di sopralluogo. Dette norme forniscono la descrizione della tipologia di struttura, gli elementi costitutivi e le caratteristiche di massa volumica, conduttività e capacità termica areica.

Il modo in cui è stato strutturato il data base favorisce una veloce individuazione e selezione del materiale specifico da parte del tecnico, pur non avendo a disposizione tutti gli elementi necessari per il calcolo. Se il tecnico avesse ad esempio la necessità di individuare uno specifico calcestruzzo di argille espanse (a struttura aperta) nel data base, gli sarebbe sufficiente possedere almeno uno dei tre valori delle caratteristiche termo fisiche. Una volta individuato, basterà selezionarlo e tutti i valori saranno automaticamente considerati per i calcoli successivi.

Inoltre, nonostante ci siano a disposizione dell'utente strutture predefinite che rispecchiano le strutture più utilizzate in edilizia, è possibile creare nuove strutture assemblando liberamente i materiali della banca dati.

Possiamo dire dunque che la caratteristica principale del data base è quella di essere stato concepito OPEN. Ogni utente può incrementare l'elenco con nuovi materiali e nuovi valori. Tale scelta scaturisce dalla grande varietà di materiali e di combinazioni di materiali che esistono in edilizia e che con un database "chiuso" rappresenterebbero un limite del software; inoltre gli utenti a cui si rivolge ODESSE sono principalmente di professionisti che possono avere l'esigenza di collocarsi ad un livello di utilizzo diverso di ODESSE e passare da meri utilizzatori a veri e propri gestori.

### 3.4 Ponti Termici

In generale si può dire che i "PONTI TERMICI" possono essere generati dalle seguenti circostanze:

- disomogeneità termica dei materiali che compongono uno strato (ad esempio la composizione di un solaio o la presenza di un pilastro di cemento armato in una parete di materiale diverso)
- disomogeneità geometrica (angoli di parete o incroci ecc.)

La presenza di un ponte termico comporta, in generale, una diversa distribuzione delle temperature sia superficiali che interne al diaframma e quindi un aumento della quantità di calore disperso.

Nella pratica generale la presenza di un ponte termico viene affrontata fornendo semplicemente una maggiore quantità di calore all'ambiente, sottovalutando l'aspetto della diversa distribuzione delle temperature sulla parete, che può portare a formazione di condensa.

La quantità di calore dispersa dai ponti termici viene calcolata, di solito, utilizzando le formule proposte dalle regole TH francesi

$$Q = K \cdot A \cdot (T_i - T_e) + K_1 \cdot L \cdot (T_i - T_e)$$

essendo:

$Q$  = quantità di calore dispersa nell'unità di tempo ( W )

$K$  = trasmittanza della parete ( W/m<sup>2</sup> • °C )

$A$  = area della superficie della parete ( m<sup>2</sup> )

$(T_i - T_e)$  = differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno

$K_1$  = trasmittanza lineare (coefficiente lineico) del ponte termico ( W / m • °C )

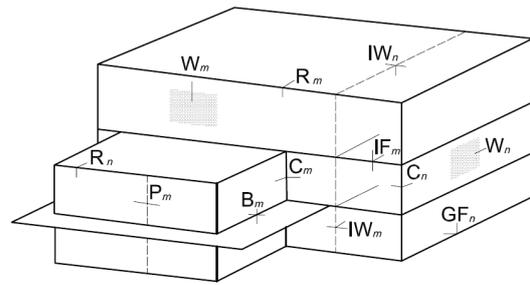
$L$  = lunghezza del ponte termico ( m )

Nello sviluppo del simulatore il calcolo delle dispersioni termiche attraverso le pareti è stato affrontato, in una prima fase, secondo quanto previsto dalla norma UNI 7357-74, in particolare per la definizione della "Trasmittanza lineare dei giunti".

Sono stati considerati i differenti casi che la norma tratta, cioè:



- R - Tetti
- B - Balconi
- C - Angoli
- IF - Piano Intermedio
- IW - Muro Interno
- GF(1) - Lastra a Piano Terra
- GF(2) - Piano Terra Sospeso
- P - Pilastri
- W - Aperture Porte e Finestre



Sono riportati i valori dei vari tipi di  $\Psi$  (internal, overall internal ed external) con  $\Psi$  = trasmittanza termica lineare del Ponte Termico, misurata in  $[W/(m^2K)]$ .

**Ponti Termici**

GF(2) - Piano Terra Sospeso

| Nome | $\psi_e$ | $\psi_{oi}$ | $\psi_i$ |
|------|----------|-------------|----------|
| GF9  | 0.75     | 0.95        | 0.95     |
| GF10 | 0.65     | 0.85        | 0.85     |
| GF11 | 0.55     | 0.75        | 0.75     |
| GF12 | 0.5      | 0.7         | 0.7      |
| GF13 | 0.6      | 0.8         | 0.8      |
| GF14 | 0.45     | 0.65        | 0.65     |
| GF15 | -0.1     | 0.1         | 0.1      |
| GF16 | 0.0      | 0.2         | 0.2      |

Invia Annulla

**Ponti Termici**

R - Tetti

$\psi_e$ : 0.6

| Nome | $\psi_e$ | $\psi_{oi}$ | $\psi_i$ |
|------|----------|-------------|----------|
| R1   | 0.55     | 0.75        | 0.75     |
| R2   | 0.5      | 0.75        | 0.75     |
| R3   | 0.4      | 0.75        | 0.75     |
| R4   | 0.4      | 0.65        | 0.65     |
| R5   | 0.6      | 0.8         | 0.8      |
| R6   | 0.5      | 0.7         | 0.7      |
| R7   | 0.65     | 0.85        | 0.85     |
| R8   | 0.45     | 0.7         | 0.7      |
| R9   | -0.05    | 0.15        | 0.15     |
| R10  | 0.0      | 0.2         | 0.2      |
| R11  | 0.05     | 0.25        | 0.25     |
| R12  | 0.15     | 0.4         | 0.4      |

Invia Annulla

Figura 3.9 – Diagrammi caratteristici dei ponti termici

Una volta scelto  $\Psi$ , per avere la dispersione del ponte termico, basta moltiplicare tale valore per la lunghezza e il numero degli stessi ponti termici presenti nell'edificio: Dispersioni P. T. =  $\sum (\Psi * l * n_{PT})$ . Il valore di lunghezza e numero di ponti termici dello stesso tipo vengono impostati nella scheda al livello superiore.

### 3.5 Impianti

Una volta terminata la descrizione dell'edificio si può passare a caratterizzare gli "Impianti" per il condizionamento estivo ed invernale dello stesso. Le temperature di comfort per l'estate e l'inverno sono quelle impostate nella prima scheda dell'interfaccia.

Questa parte è in via di sviluppo in quanto le varie università che collaborano al progetto stanno fornendo i modelli dei vari impianti da inserire nella piattaforma.

Sono comunque state impostate in base ai moduli da noi sviluppati e alle direttive fornite dalle stesse università le prime finestre di dialogo per l'inserimento dei parametri che caratterizzano il funzionamento di alcuni impianti.

Dalla schermata dei dati generali degli impianti è possibile caratterizzare il combustibile, con il suo potere calorifico, peso specifico e costo (comprensivo di accise uso civile), e il volume dell'accumulo termico.

Vista la tipologia di impianti al momento disponibili, l'unico combustibile presente è il gas. In seguito, avendo a disposizione altri modelli si potranno scegliere anche altri combustibili, e caratterizzarli tenendo conto in particolare della variazione del costo negli anni.

The screenshot shows the 'Impianti' (Plants) tab in the ODESSE software. The window title is 'ODESSE (Optimal DESign for Smart Energy) v0.2'. The menu bar includes 'File', 'Action', 'DataBase', and 'Help'. The main area is titled 'DATI GENERALI IMPIANTI' and contains several sections for selecting and configuring different types of plants:

- DATI GENERALI IMPIANTI:** Fields for 'Potere calorifico gas [Kcal/Kg]' (12,000), 'Peso specifico gas [Kg/m³]' (0,72), 'Costo gas comprensivo di accise uso civile [Euro/m³]' (0,45), and 'Volume accumulo termico (Tank) [m³]' (5,000).
- COGENERATORE:** Includes a 'Seleziona Turbina' button and a field for 'Potenza Nominale = 30.0 [kW]'. The 'CALDAIA' section includes a 'Seleziona Caldaia' button and fields for 'Potenza Nominale = 30.0 [kW/s]', 'Rendimento Caldaia = 0.92', and 'Rendimento Distribuzione = 0.95'.
- FOTOVOLTAICO:** Includes a 'Seleziona Fotovoltaico' button and fields for 'Numero di moduli = 50.0', 'Potenza Totale = 9.25 [kW]', and 'Inclinazione: 0.0 - Azimut: 0.0'.
- POMPE DI CALORE:** Includes a 'Seleziona Pompa di Calore' button and fields for 'Potenza Termica Nominale = 17.5 [kW]' and 'Temperatura di Mandata = 3.0 [°C]'.
- POMPE GEOTERMICHE:** Includes a 'Seleziona Pompa Geotermica' button and fields for 'Invernale - Orizzontale', 'Profondità di posa = 0.0 [m]', and 'Temperatura di Mandata = 3.0 [°C]'.

The ENEA logo and the text 'Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente' are visible at the bottom of the interface.

Figura 3.10 – Pagina dell'interfaccia per la scelta preliminare degli impianti

Di seguito sono riportate le finestre di dialogo di alcuni impianti.

### Caldaia

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| Potenza Nominale Caldaia [KJ/s] | 30   |
| Rendimento Caldaia              | 0,92 |
| Rendimento Distribuzione        | 0,95 |



Invia Elimina Annulla

### Turbine

Capston 30

Nominale Cogeneratore [KW]

30



Invia Elimina Annulla

### Fotovoltaico

Numero di Moduli 50

Potenza Totale [KW] 9.25

Inclinazione 0

Azimut 0



Invia Elimina Annulla

### Pompe di Calore

Potenza Nominale Termica [KW] 17,5

Temperatura di Mandata 3 °C



Invia Elimina Annulla

### Pompe Geotermiche

**CARATTERISTICHE IMPIANTO**

Interramento: Orizzontale

Fabbisogno Termico: Solo Invernale

Tipo di Pompa di Calore: pompa di calore 1

Temperatura di Mandata: 3 °C

Profondità di posa [m]: 4,5

Ore di funzionamento: fino a 1000 ore/anno



**CARATTERISTICHE SONDA ORIZZONTALE**

Lunghezza [m]: 6,5

Numero: 1

Tipologia di Riempimento: Singola U - bentonite

Installazioni vicine: Nessuna

**VERTICALE**

Tipo di Sistema: a sbancamento

Lunghezza [m]: 0

Lunghezza di trincea [m]: 0

Tipologia di sonda: slinky

Invia Elimina Annulla

Figura 3.11 – Caratteristiche degli impianti

In particolare è possibile caratterizzare la caldaia a condensazione attraverso la potenza nominale, e il rendimento della caldaia e quello di distribuzione. Il micro-cogeneratore viene invece caratterizzato scegliendo il tipo di turbina (e corrispondentemente la sua potenza nominale). Il fotovoltaico viene descritto attraverso l'orientamento (inclinazione e azimut) e il numero dei moduli a potenza fissa (ad esempio da 185 W). Per caratterizzare le pompe di calore ad adsorbimento è invece necessario inserire la potenza nominale termica e la temperatura di mandata, le pompe geotermiche invece hanno bisogno di essere caratterizzate da diversi parametri. Innanzitutto va preso in considerazione il tipo di interrimento (orizzontale o verticale), in base a questo infatti cambiano le caratteristiche della sonda. Poi bisogna prevedere il tipo di fabbisogno

termico che deve soddisfare: invernale, estivo o entrambi. Infine si passa a caratterizzare la pompa di calore associata e le ore previste di funzionamento.

### 3.6 Schede riepilogative

Immessi i dati progettuali il preprocessore calcola gli ultimi vincoli ed elabora tutti i dati, che vengono visualizzati nella prima scheda riassuntiva come è stato descritto attraverso il diagramma di flusso in figura 3.1. Questi variabili sono ad esempio il numero dei giorni e le ore giornaliere di riscaldamento, in base alla zona climatica, il calcolo della temperatura fittizia  $dt$  per ogni parete, il rapporto Superficie/Volume, il calcolo delle dispersioni, della capacità termica e degli altri parametri delle equazioni dell'edificio.

Questi possono essere stampati, salvati su file in formato testuale ed è possibile verificare la correttezza dei dati immessi: in caso negativo si può tornare indietro (pulsante annulla) ed effettuare i cambiamenti dei parametri ritenuti sbagliati, in caso positivo si può lanciare la simulazione.



Figura 3.12 – Prima scheda riassuntiva

La simulazione dura qualche secondo; il tempo effettivo può variare in base al numero di giorni simulati e alla velocità del processore di calcolo. Effettuata la simulazione, attraverso la seconda scheda riepilogativa, vengono visualizzati i dati prestazionali principali, quelli cioè che caratterizzano le performance dell'edificio. In particolare questi sono il fabbisogno termico (FTA) estivo ed invernale, il consumo elettrico, il fabbisogno di energia primaria (EP) estivo ed invernale,

il costo della climatizzazione estiva, quello del riscaldamento ed il costo elettrico (compresa la climatizzazione).



Figura 3.13 – Seconda schedariassuntiva (performance)

Vengono inoltre visualizzati dei grafici dove è possibile analizzare i valori delle temperature della stanza e quella ambientale e i valori dei carichi termici estivi ed invernali. Questi grafici possono essere salvati, e visualizzati in maggior dettaglio, tramite alcune funzionalità, come l'ingrandimento della parte selezionata, lo scalamento di uno entrambi gli assi, o altre funzionalità che si possono vedere e scegliere premendo il pulsante destro del mouse.

I dati sono salvati in formato mat. Tutti le variabili di comunicazione tra i vari moduli sono in questo formato, per evitare errori e perché il motore del simulatore è realizzato in simulink, l'ambiente di programmazione associato a MATLAB. Questo formato di file è associato infatti alle variabili o ai workspace di MATLAB, ma può essere letto da altri programmi tramite opportune librerie e permette di salvare vettori e matrici.

I dati finali possono anche essere salvati in altri formati in modo da poter essere aperti da un editor testuale o da Excel.

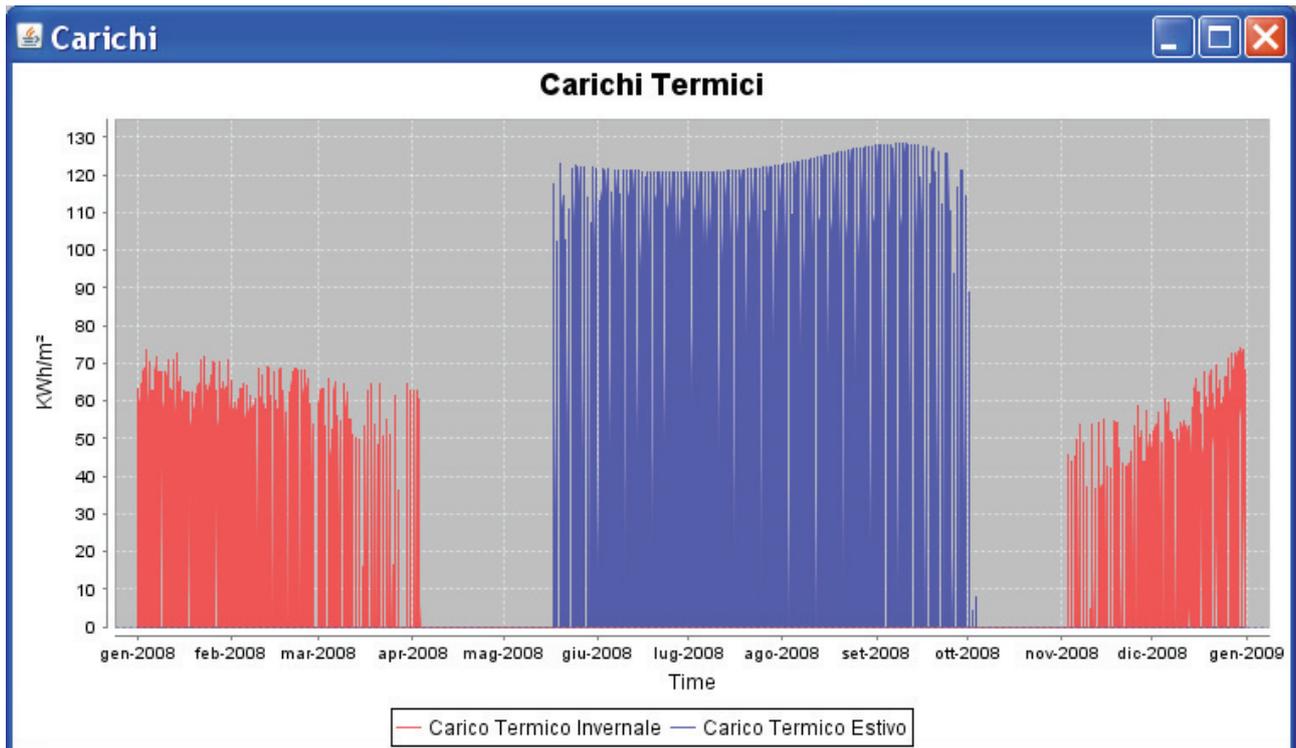
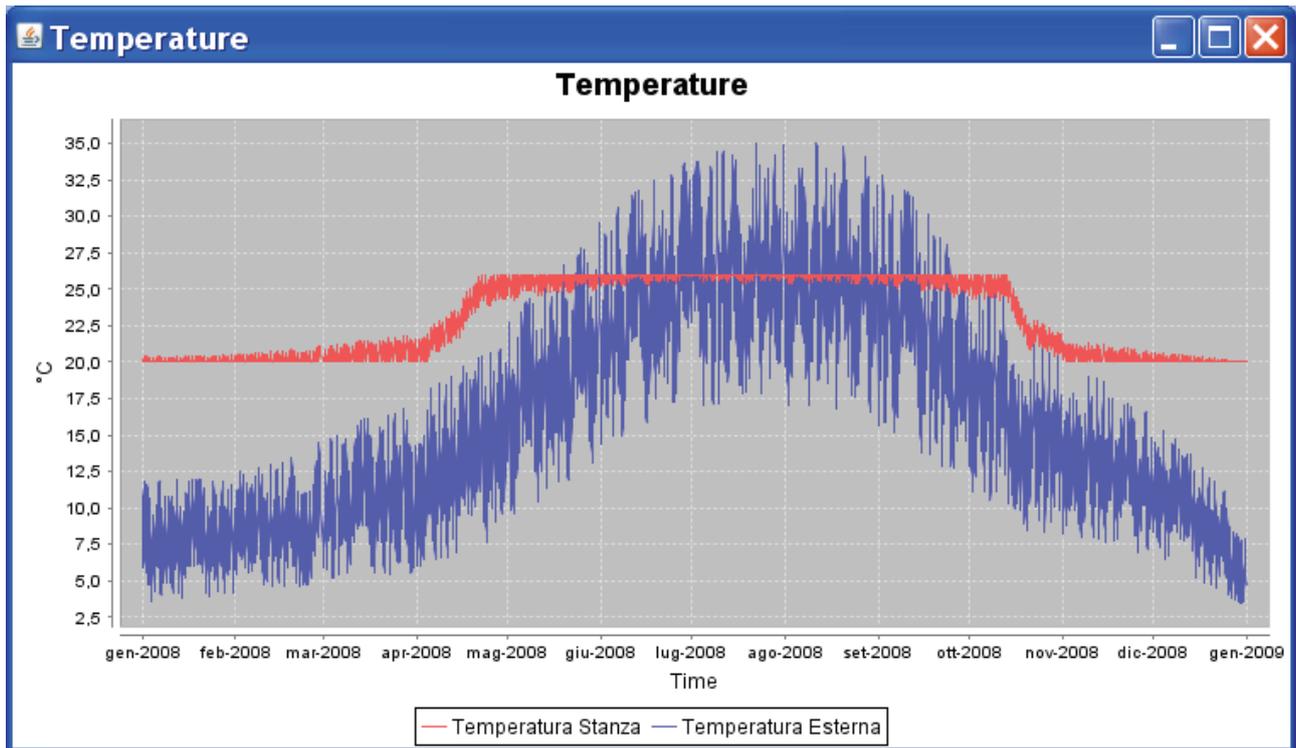


Figura 3.14 – Grafici finali

## 4. Neural Weather Generator: una metodologia innovativa per la generazione di dati climatici

In questo capitolo viene mostrato come definire modelli per la stima di dati climatici, in particolare la temperatura ambientale e la radiazione solare, attraverso tecniche di ‘*soft computing*’ (reti neurali, algoritmi evolutivi, sistemi ‘fuzzy’ ed approcci ibridi).

Lo scopo di tale lavoro è quello di ottenere dei modelli che siano sufficientemente affidabili da poter essere utilizzati all’interno della piattaforma software ODESSE nell’ambito della progettazione di edifici eco-sostenibili.

In particolare, il lavoro si è focalizzato sullo sviluppo di modelli di stima di dati mensili per località ignote e di dati giornalieri dai quali poter successivamente ricavare dati orari. I modelli migliori sono stati quindi applicati per la stima del carico termico di un edificio.

I risultati ottenuti hanno dimostrato la precisione e l’affidabilità dei modelli adottati alla fine del lavoro di ricerca.

Il capitolo è strutturato come segue : il paragrafo 4.1 introduce l’argomento facendo una supervisione dello stato dell’arte, nei paragrafi 4.2, 4.3, 4.4 vengono descritte le metodologie utilizzate in questo lavoro, i paragrafi 4.5, 4.6 descrivono i casi applicativi, nel paragrafo 4.7 vengono ampiamente trattati i risultati sperimentali ed infine il paragrafo 4.8 riportata sinteticamente gli obiettivi ed i risultati raggiunti.

### 4.1 Introduzione

La progettazione di sistemi di produzione di energia efficienti basati sul sole (fotovoltaico, termico) e di edifici eco-sostenibili che massimizzino la produzione e minimizzino i consumi energetici dipendono fortemente da simulazioni la cui accuratezza di stima di alcuni parametri ambientali è cruciale. Tra questi, i più importanti sono la radiazione solare, la temperatura e l’umidità ambientali. Il primo di questi è relativamente facile da modellare, poiché dipende esclusivamente dalle coordinate geografiche e dal giorno dell’anno, e lavoro su questo è già stato fatto. Viceversa gli altri due sono più difficili in quanto dipendono da un elevato numero di variabili, ovvero da effetti locali, che non sono sempre misurate (es. vento, pressione, etc.) e che hanno effetti altamente non lineari.

In questo contesto i problemi che bisogna affrontare sono essenzialmente due :

- i dati sono disponibili come medie mensili
- i dati disponibili sono solo per una piccola frazione rispetto a tutte le località

Per quel che riguarda il primo problema, esistono algoritmi che stimano valori orari dai dati giornalieri, ma non esistono metodi per stimare dati giornalieri da dati mensili. Il secondo problema è forse ancora più sentito da parte degli utenti di simulatori di edifici in quanto essi devono fornire ai loro tool i più affidabili dati climatici a loro disposizione in relazione alla località di interesse ed è pratica comune di usare il dato della località più vicina (‘*Nearest Neighbor*’). Questo approccio può essere causa di errori elevati in quanto non è sempre vero che località vicine hanno comportamenti climatici simili (es. profili di temperatura).

Approcci di modellazione classici coinvolgono diverse tecniche di interpolazione.

L’interpolazione spaziale permette di stimare ciascun dato climatico lontane da quelle in cui il dato esiste. Con questi metodi è possibile fare stime fino a scala continentale e la risoluzione spaziale è tipicamente dell’ordine dei chilometri. Tali tecniche variano in complessità ed accuratezza, dai semplici tassellazione Thiessen e distanza basata sull’inverso del quadrato ai metodi più complessi quali filtro gaussiano troncato, metodi Kriging e co-Kriging e variazioni delle interpolazioni spline. La scelta del metodo dipende dalla velocità computazionale richiesta e dalla natura del fenomeno. In generale, i metodi semplici sono veloci ma hanno una bassa precisione mentre i metodi complessi hanno un’elevata precisione ma sono computazionalmente dispendiosi, per cui nell’ambito della progettazione di edifici questi ultimi sono difficilmente applicabili.

Applicazioni variano dalle spline multidimensionale regolarizzate con tensione (RST) ove le stazioni meteorologiche sono spazialmente interpolate su tutta l'Europa per ottenere profili di temperatura, ad insiemi di equazioni per predire umidità relativa, temperatura e vento di località in India, fino all'utilizzo di funzioni di densità di probabilità per stimare profili di temperatura su località in Australia.

Per risolvere problemi simili, nell'ultimo decennio si sono affermate nella comunità scientifica le metodologie di *'soft-computing'* il cui nome indica il fatto che tali metodi sono basati non su tecniche analitiche, spesso molto difficili da sviluppare e computazionalmente dispendiose, ma bensì sul fatto di fornire soluzioni che gestiscono l'incertezza. In questo ambito ricadono le tecniche quali : reti neurali, sistemi fuzzy, algoritmi evolutivi. Tali metodologie sono state ultimamente applicate anche nel campo della modellazione di parametri ambientali ottenendo dei risultati interessanti. In particolare, le reti neurali sono modelli *'black-box'* basati su apprendimento tramite esempi (dati) e che non richiedono alcuna conoscenza a priori del fenomeno. Tali tecniche sono state utilizzate nella modellazione di temperatura ed umidità interna (non ambientale!) e della radiazione solare.

Il maggior vantaggio di queste tecniche risiede nel fatto di trovare un compromesso ottimale tra accuratezza e velocità.

In questo contesto abbiamo affrontato il problema della modellazione della radiazione e della temperatura ambientale applicando metodologie di *soft-computing*. In particolare, per quest'ultimo parametro mostreremo che un modello di stima della temperatura affidabile può migliorare sensibilmente (circa il 20%) l'errore di stima sui consumi di energia.

Tale lavoro è altamente innovativo perché metodologie messe in campo non erano mai state applicate al problema della modellazione della temperatura ambientale e perché tale problema in precedenza è stato risolto ottenendo precisioni soddisfacenti solo con tecniche analitiche computazionalmente molto pesanti.

## 4.2 La teoria degli insiemi sfumati

Consideriamo un insieme  $X$  ed un qualsiasi suo sottoinsieme  $A$ . Nella teoria classica degli insiemi l'appartenenza di ogni elemento  $x$  di  $X$  a questo suo sottoinsieme è indicata in maniera certa con il concetto di "appartenenza".

Se consideriamo, per esempio, l'insieme

$X = \{\text{popolazione di una città}\}$  ed il suo sottoinsieme  $A = \{\text{popolazione maschile di } X\}$ , possiamo definire per ogni abitante della città considerata, in base al sesso la sua appartenenza all'insieme  $A$  che abbiamo definito.

Formalmente definiamo una funzione di appartenenza  $\mu_A(x)$  tale che

$$\mu_A(x) = 1 \quad \text{se } x \text{ è uomo}$$

$$\mu_A(x) = 0 \quad \text{se } x \text{ è donna}$$

Ci sono, però, dei casi in cui la teoria classica non riesce a classificare in maniera adeguata gli elementi di un sottoinsieme dell'universo del discorso. Ad esempio, consideriamo l'universo  $X$  che racchiude la popolazione di una città e consideriamone il sottoinsieme che include le persone di statura alta.

Volendo applicare la teoria classica degli insiemi, supponiamo di porre un limite per il quale si possa dire che tutte le persone al di sopra di 1.70 m. possono considerarsi alte. Questo tipo di posizione, però, non descrive compiutamente l'insieme delle persone alte di una città, poiché è evidente che le persone di 1.70 m non sono più alte di quelle di 1.69 m in maniera così netta da poter dire che le prime sono alte, mentre le seconde non lo sono. E la cosa appare ancora più evidente confrontando le persone alte 1.70 m con quelle che sono alte 2.00 m.

Quello che in realtà possiamo dire è che queste tre categorie di persone sono più o meno tutte appartenenti al sottoinsieme "popolazione alta  $X$ ", ma con grado differente.

Infatti, le persone alte 1.70 m sono alte solo leggermente più di quelle di 1.69 m, mentre lo sono meno di quelle alte 2.00 m. Volendoci esprimere in maniera diversa: le persone alte 2.00 m appartengono più di quelle di 1.70 m e 1.69 m al sottoinsieme delle persone alte; a cui queste due ultime categorie appartengono in misura pressoché uguale.

Un'idea centrale nella filosofia Platonica è che, nel mondo reale, gli elementi sono perturbati da imperfezioni e quindi, per esempio non esiste alcun elemento perfettamente circolare. Le "nozioni perfette" o i "concetti esatti" corrispondono ad un tipo di oggetti tenuti in conto nella matematica pura, mentre le "strutture inesatte" prevalgono nella vita reale. E' convinzione diffusa che le strutture inesatte siano ricche abbastanza di operazioni e proprietà da essere di uso autentico nella costruzione di modelli per un'ampia varietà di situazioni. E' nostro intento introdurre un punto di vista unificante per la nozione di inesattezza, basata sulla teoria dei fuzzy set introdotta da Zadeh nel 1962; in tale articolo viene ipotizzata una "matematica fuzzy" o di quantità turbate che non sono descrivibili in termini di distribuzioni di probabilità. A questo articolo ne seguì un altro nel 1965 ove può trovarsi una esposizione tecnica proprio di una tale matematica definita teoria dei fuzzy set. Non esiste però un modo unico per costruire una tale teoria, tutti gli approcci di cui tratteremo però includono la teoria degli insiemi ordinari come caso particolare. La teoria dei fuzzy set di Zadeh, appare come la più intuitiva, sebbene concetti come l'inclusione o l'uguaglianza possono sembrare troppo restrittivi. C'è, inoltre una certa arbitrarietà nella scelta dell'insieme di valutazione per gli elementi: l'intervallo  $[0,1]$  è il più comunemente usato, ma sono possibili anche altre scelte come quelle che compaiono sotto l'etichetta L-fuzzy sets. Nel 1967 Goguen fornisce le ragioni che sostengono la rappresentazione dei concetti inesatti con i fuzzy sets. L'argomento più convincente è un teorema di rappresentazione che dice che qualsiasi sistema che soddisfa certi assiomi è equivalente ad un sistema di fuzzy sets.

Essenzialmente, la sfocatezza (*fuzziness*) è un tipo di imprecisione che deriva da un raggruppamento di elementi in classi che non hanno confini ben definiti. Tali classi, chiamate fuzzy sets, sorgono, per esempio, ogni qualvolta descriviamo l'ambiguità, la vaghezza e l'ambivalenza nei modelli matematici di fenomeni empirici. Poiché certi aspetti della realtà sfuggono sempre da tali modelli, l'approccio strettamente binario (e persino ternario) al trattamento di fenomeni fisici non è sempre adatto per la descrizione di sistemi nel mondo reale e gli attributi delle variabili di sistema spesso emergono da una vaghezza elusiva, da un riadattamento del contesto o da un effetto dell'imprecisione umana. In molti casi, comunque, anche se il modello è preciso, la sfocatezza può essere una concomitante della complessità.

La teoria dei fuzzy sets ha tra i suoi scopi lo sviluppo di una metodologia per la formulazione e la soluzione di problemi che sono troppo complessi o troppo mal definiti da essere suscettibili di un'analisi da parte di tecniche convenzionali.

La teoria dei fuzzy sets si occupa di un sottoinsieme A dell'universo X, dove la transizione tra la piena appartenenza e la non appartenenza è graduale piuttosto che improvvisa. Volendo esprimere formalmente questo concetto dobbiamo modificare la funzione di appartenenza vista precedentemente. Con la nuova funzione caratteristica non dovremo indicare più la semplice appartenenza, ma il grado di appartenenza; quindi questa funzione non assumerà più i semplici valori  $\{0,1\}$ , ma un valore compreso nell'intervallo  $[0,1]$  dei reali con la convenzione che la funzione caratteristica sia crescente cioè l'appartenenza massima avrà grado uno.

La nuova funzione caratteristica avrà la forma:

$$\mu_A(x) = y \in [0,1]$$

Volendo esemplificare, consideriamo tre persone della città descritta dall'universo X. Supponiamo che l'altezza della prima persona sia quella di 1.69 m, quella della seconda 1.70 m, quella della terza 2.00 m.

Una possibile assegnazione di valori per queste tre persone potrebbe essere

$$\mu_A(\text{prima persona}) = 0.49$$

$$\mu_A(\text{seconda persona}) = 0.50$$

$$\mu_A(\text{terza persona}) = 0.85$$

Facciamo notare come non vi sia nessuna relazione di tipo numerico tra i valori assunti dalla funzione di appartenenza ed il valore che misura in metri le altezze reali delle persone. Questo perché noi con la funzione di appartenenza indichiamo solo il grado di appartenenza stesso al sottoinsieme.

E' anche vero che questi valori sono del tutto arbitrari, e potrebbero essere ridefiniti con qualsiasi altra terna di valori che rispetti le relazioni esistenti tra gli elementi  $x$  dell'universo  $X$ . Inoltre il concetto espresso include anche la definizione classica di appartenenza ad un insieme. Fin qui il concetto alla base della teoria fuzzy.

A causa della sua generalizzazione tale teoria ha uno scopo più ampio di applicabilità della teoria astratta degli insiemi nella risoluzione di problemi che comportano in qualche modo una valutazione soggettiva. Intuitivamente, quindi, un fuzzy set è una classe che ammette la possibilità di appartenenza parziale in essa.

Sia  $X$  uno spazio di oggetti (universo del discorso) e  $x$  un generico elemento di  $X$ .

Un "fuzzy set"  $A$  in  $X$  è caratterizzato da una "funzione di appartenenza"  $\mu_A(x)$ :

$$\mu_A: x \in X \rightarrow \mu_A(x) \in [0,1] \text{ incluso in } \mathbb{R}$$

dove  $\mu_A(x)$  è detto grado di appartenenza di  $x$  in  $A$

In altre parole più il valore di  $\mu_A(x)$  si avvicina ad 1, più  $x$  appartiene ad  $A$ .

Se  $A$  è un insieme ordinario la  $\mu_A$  si riduce alla nota "funzione di appartenenza":

$$\mu_A: x \in X \rightarrow \mu_A(x) \in \{0,1\}$$

$$\mu_A(x)=1 \text{ sse } x \in A$$

$$\mu_A(x)=0 \text{ sse } x \notin A$$

Notiamo che, per i fuzzy sets viene a mancare il significato di confine risultando non ben definito.

Il fuzzy set  $A$  è completamente caratterizzato dall'insieme delle coppie

$$A = [(x, \mu_A(x)), x \in X]$$

In questo contesto preferiamo però utilizzare la seguente notazione proposta da Zadeh:

Supponiamo che l'insieme finito  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  sia espresso come  $X = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ , con l'accordo che questa è la rappresentazione di  $X$  come unione dei "singletons" che lo costituiscono, dove il segno + gioca il ruolo di "unione" piuttosto che di somma aritmetica.

(Nota:  $x_j + x_k = x_k + x_j$  e  $x_j + x_j = x_j$  per  $j, k = 1, 2, \dots, n$ )

Come semplice estensione di questa notazione un fuzzy set  $A$  su  $X$ , se  $X$  è un insieme finito  $\{x_1, \dots, x_n\}$ , sarà espresso come:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n$$

Se  $X$  non è finito:

$$A = \int_X \mu_A(x)/x$$

(I simboli  $\int$  e  $+$  non vanno intesi in senso matematico, ma in quello di unione insiemistica)

E' importante notare che l'insieme  $X$ , considerato come universo, non è un insieme fuzzy.

I gradi di appartenenza denotano un ordinamento degli oggetti nell'universo; è interessante notare che il valore di grado di appartenenza  $\mu_A(x)$  di un oggetto  $x$  in  $A$  può essere interpretato come il grado di compatibilità del predicato associato ad  $A$  ed all'oggetto  $x$ .

In generale distinguiamo tre tipi di inesattezza:

- generalità, che è un concetto che si applica ad una varietà di situazioni;
- ambiguità, che descrive più di un sottoconcetto distinguibile;
- vaghezza, se non sono definiti limiti precisi.

Tutti e tre i tipi di inesattezza sono rappresentati da un fuzzy set.

La "generalità" occorre quando l'universo non è solo un punto, l'ambiguità si presenta quando c'è

più di un massimo locale di una funzione di appartenenza e la vaghezza occorre quando la funzione assume valori diversi da 0 e 1.

L'insieme **fuzzy vuoto** è l'insieme per cui ogni elemento dell'universo  $X$  ha valore di appartenenza nullo:

$$A = \emptyset \iff \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X$$

Due fuzzy sets  $A$  e  $B$  sono detti essere **uguali** se e solo se

$$\int_X \mu_A(x)/x = \int_X \mu_B(x)/x$$

oppure

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

Definiamo infine l'**inclusione** di due fuzzy sets come:

$$A \text{ contenuto in } B \iff \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

$$\text{ovvero } \int_X \mu_A(x)/x \leq \int_X \mu_B(x)/x.$$

Si noti che il  $\leq$  è dato qui in senso booleano.

### Operatori

L'unione e l'intersezione classica può essere estesa ad insiemi fuzzy attraverso formule proposte da Zadeh.

Siano  $A$  e  $B$  fuzzy sets,  $\mu_A, \mu_B$  funzioni di appartenenza di  $A$  e  $B$ .

Il fuzzy set **unione** di  $A$  e  $B$  è un fuzzy set  $C=A \cup B$  la cui funzione di appartenenza è relazionata a quelle di  $A$  e  $B$  da:

$$\mu_C(a,b) = \max(\mu_A(a), \mu_B(b)) \quad a \in A, b \in B$$

ovvero  $A \cup B$  è  $\int (\mu_A(a) \vee \mu_B(b)) / (a,b)$  dove  $\vee$  è il simbolo di max.

L'operazione binaria  $\cup$  gode della proprietà associativa.

L'unione si può definire equivalentemente come "il più piccolo fuzzy set che contiene  $A$  e  $B$ "

Il fuzzy set **intersezione** di  $A$  e  $B$  è un fuzzy set  $D=A \cap B$  la cui funzione di appartenenza è:

$$\mu_D(a,b) = \min(\mu_A(a), \mu_B(b)) \quad a \in A, b \in B$$

ovvero  $A \cap B$  è  $\int (\mu_A(a) \wedge \mu_B(x)) / (a,b)$  dove  $\wedge$  è il simbolo di min

L'intersezione tra  $A$  e  $B$  è il più grande fuzzy set contenuto sia in  $A$  che in  $B$ .

L'operazione binaria  $\cap$  è associativa.

Notiamo che queste formule danno l'unione e l'intersezione ordinarie quando l'insieme di valutazione è ridotto a  $\{0,1\}$ . Ovviamente ci sono altre possibili estensioni dell'unione e dell'intersezione.

Se  $A_1, \dots, A_k$  sono sottoinsiemi fuzzy di  $X$ , e  $w_1, \dots, w_k$  sono pesi non negativi che si sommano all'unità, allora una **combinazione convessa**  $A = A_1 \oplus, \dots, \oplus A_k$  è un fuzzy set la cui funzione di appartenenza è espressa da:

$$\mu_A = w_1 \mu_{A_1} + \dots + w_k \mu_{A_k}$$

dove in questo caso il simbolo  $+$  indica la somma aritmetica. Il concetto di una combinazione convessa è utile nella rappresentazione dei modificatori linguistici come "essenzialmente" e "tipicamente" modificano i pesi associati alle componenti di un fuzzy set.

## 4.2 Le reti neurali

In questo paragrafo daremo una breve descrizione della sintassi e della semantica elementare delle reti neurali.

## Semantica elementare

I componenti più semplici delle RNA sono due: *nodi* e *connessioni*.

È un **nodo** un luogo dove in modo stabile **cambiano** delle forze:

$$\xrightarrow{I} N \xrightarrow{O} I' O$$

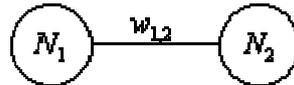
Un nodo è, quindi, il **punto stabile** di una trasformazione tra Input e Output:

$$Nodo_i = T_i(I \rightarrow O)$$

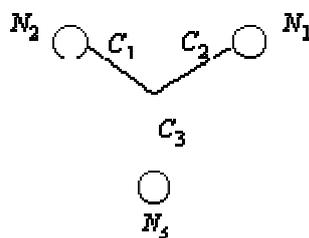
Ogni nodo è, quindi, caratterizzato morfologicamente da **tre micro-componenti inseparabili**:

- Un valore di Input, che è una forza.
- Un valore di Output, che è una forza.
- Un operatore trasformazionale tra Input e Output, che è una funzione.

Una **connessione** è il **valore** della forza che connette come Input e/o Output almeno due nodi:



È, comunque, possibile che una connessione avvenga tra due o più connessioni.



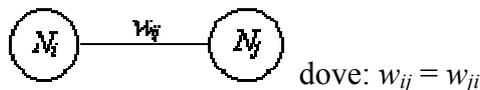
dove:  $N = \text{Nodo}$ ;  $C = \text{Connessione}$

In questo caso la connessione che connette le altre è detta **Meta Connessione** e il punto nel quale le connessioni si incontrano è detto **nodo virtuale** o **unità PHI**. Naturalmente, la Meta Connessione è identificata dalla connessione verso la quale convergono i segnali delle altre connessioni in un certo istante. Se, ad esempio, nella figura precedente il Nodo  $N_3$  riceve dei segnali dai nodi  $N_1$  e  $N_2$ , allora  $C_3$  sarà la Meta Connessione tra le connessioni  $C_1$  e  $C_2$ . In generale, comunque, ogni connessione è caratterizzata da tre attributi inseparabili:

- la coppia di nodi connessi.
- il valore della connessione.
- il tipo di connessione.

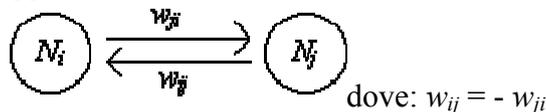
Esiste una tipologia elementare delle Connessioni tra nodi:

**1. Connessioni Simmetriche:** quando una coppia di Nodi è connessa da un solo valore:



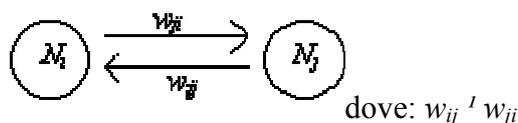
dove:  $w_{ij} = w_{ji}$

**2. Connessioni Anti-Simmetriche:** quando una coppia di nodi è connessa da due valori, di cui uno è l'opposto dell'altro:



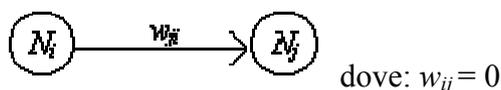
dove:  $w_{ij} = -w_{ji}$

**3. Connessioni Bi-direzionali:** quando una coppia di nodi è connessa da due valori indipendenti:



dove:  $w_{ij} \neq w_{ji}$

**4. Connessioni Mono-Direzionali:** quando una coppia di nodi è connessa da un solo valore con un verso fisso:



dove:  $w_{ij} = 0$

**5. Connessioni Riflessive:** quando il nodo di origine e di arrivo della connessione è lo stesso:



dove:  $w_{ii} \neq 0$

### Sintassi elementare

I concetti del funzionamento Elementare di una RNA sono tre:

1. Input Netto
2. Attivazione
3. Regola Delta

L'**Input Netto** è il valore globale del potenziale che arriva ad un Nodo. Tale valore è, ovviamente, in rapporto a tre parametri:

- il valore di **Attivazione** dei Nodi che hanno una Connessione direzionata verso il Nodo di riferimento;
- il valore delle **Connessioni** di tali Nodi con il nodo di Riferimento;
- il valore della **Soglia** interna del Nodo di riferimento. La Soglia di un Nodo qualsiasi non è altro che un Nodo, con valore fisso uguale a +1, connesso monodirezionalmente con il Nodo di riferimento. Se con  $u_j$  intendiamo i Nodi **emittenti**, con  $u_i$  intendiamo un qualsiasi Nodo **ricevente** e con  $w_{ij}$  la loro matrice di connessioni, allora l'Input Netto di un qualsiasi Nodo  $u_i$  sarà determinato dalla seguente equazione:

$$Net_i = \sum_j^N u_j \cdot w_{ij} + \theta_i$$

dove:  $N$  = numero dei Nodi emittenti;  $q_i$  = l'inverso della soglia del Nodo ricevente. Il valore di connessione  $q_i$  viene definito **Bias**. A prescindere dal significato letterale di questa parola, con Bias si intende il concetto opposto a quello di soglia. Si potrebbe, quindi, definire il Bias di un Nodo la sua **Inclinazione**: inclinazione del Nodo ricevente ad **attivarsi** o a **disattivarsi**. Se, quindi, la soglia  $s_i$  di un nodo  $n_i$  è **negativa**, allora ciò significa che quel nodo ha un'inclinazione ad **attivarsi**, e viceversa. Formalmente:

$$Bias = -soglia \text{ or } q_i = -s_i$$

Il **Bias** è una connessione tra due nodi come le altre; con la particolarità che il nodo emittente, in questo caso ha valore **unitario** e **fisso**. L'**Attivazione** di un Nodo è il valore che assume quel Nodo a partire da uno specifico Input Netto. In alcuni casi il valore di Attivazione può coincidere con quello di Output del Nodo, in altri casi si può trattare di valori diversi e successivi. Nel primo caso si ha che l'Attivazione di un Nodo corrisponde al valore di Output di quel Nodo tramite una trasformazione del suo Input Netto.

$$Output_i = f(Net_i)$$

Nel secondo caso il valore di Attivazione corrisponde ad uno **stato interno** del Nodo che sarà sottoposto ad una ulteriore trasformazione prima di assumere un proprio valore di Output:

$$Output_i = f^1 \left\{ \underbrace{f^2(Net_i)}_{Attivazione} \right\}$$

e quindi, se  $A_i = f(Net_i)$ , allora :

$$Output_i = f(A_i)$$

Il tipo di trasformazione tramite la quale un Nodo passa dal suo valore di Input Netto ad uno di Attivazione è una **funzione**, detta, spesso, **Equazione di Trasferimento**. Le equazioni di trasferimento possono essere di tipo diverso e le più comuni sono :

Lineare

$$Output_i = Net_i$$

Rampa

if  $Net_i > 1$   $Output_i = 1$   
 if  $Net_i < -1$   $Output_i = -1$   
 if  $-1 \leq Net_i$   $Output_i = Net_i$

Gradino

if  $Net_i > 0$   $Output_i = 1$   
 if  $Net_i < 0$   $Output_i = -1$   
 if  $Net_i = 0$   $Output_i = 0$

Sigmoidale

$$Output_i = \frac{1}{1 + e^{-Net_i}} \quad ] < Output_i < 1$$

Tangente Iperbolica

$$Output_i = \frac{e^{Net_i} - e^{-Net_i}}{e^{Net_i} + e^{-Net_i}} \quad -1 < Output_i < +1$$

Arcotangente

$$Output_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \text{Arctg}(Net_i) \quad ] < Output_i < 1$$

Sinusoidale

$$Output_i = \text{Sin}(Net_i) \quad -1 \leq Output_i \leq +1$$

La regola **Delta** è la misura di modifica dei valori delle Connessioni di una RNA; l'equazione nella quale questo valore si inserisce è del tipo:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}$$

dove:  $t$  = tempo reso discreto ( $t+1$ ,  $t+2$ ,  $t+n$ );  $w_{ij}$  = valore della connessione.

Il criterio per stabilire come si calcola il valore Delta è specifico ad ogni tipo di RNA.

Inoltre, il valore Delta può essere calcolato anche per **Nodi** e per alcuni **Attributi** dei **Nodi**.

$$u_i(t+1) = u_i(t) + \Delta v_i$$

In questo caso è il Nodo  $u_i$  che al tempo  $t+1$  **aggiornerà** il suo valore della quantità  $D v_i$ .

Nel caso, ad esempio, si intenda far scoprire ad ogni Nodo  $u_i$  la giusta sagomatura del sigmoide che regola il proprio valore di Attivazione, allora si può procedere nel modo seguente:

**a)** Supponiamo che l'equazione di trasferimento per tutti i nodi  $u_i$  sia:

$$u_i = \frac{1}{1 + e^{-Net_i}}$$

**b)** Supponiamo che dividendo  $Net_i$  per un fattore  $T$  la sagoma del sigmoide possa assumere due comportamenti limite:

$T \rightarrow 0$  il sigmoide si trasforma in un **gradino** (cfr (3c));

$T \rightarrow +\infty$  il sigmoide si trasforma in una retta parallela all'asse delle ascisse con ordinata 0.5.

**c)** Quindi per tutti i valori compresi tra 0 e  $+\infty$   $T$  modifica la sagoma del sigmoide in modo sfumato: verso 0 tende ad irrigidirsi in uno scalino, mentre quando  $T$  va a  $+\infty$  tende ad ammorbidirsi fino alla forma di una retta parallela all'asse ascissa con ordinata uguale a 0.5.

**d)** Se  $T_i$  è la sagoma della unità  $u_i$  allora:

$$T_{i(t+1)} = T_{i(t)} + \Delta v_i$$

è l'equazione che regola la sagoma di ogni sigmoide di ogni Nodo  $u_i$ .

In questo caso il valore Delta è utilizzato per **aggiornare** il valore di un attributo dei Nodi della RNA.

Il valore Delta è regolato da una equazione specifica che definiamo **equazione di aggiornamento**; la sua forma tipica è:

$$y_{t+1} = y_t + \Delta x$$

Se si riduce il valore Delta all'aggiornamento dei valori delle connessioni di una RNA è possibile individuare il criterio principale, sul quale si basa l'algoritmo di addestramento "Back-Propagation" è quello del Gradiente Discendente.

La tecnica del **Gradiente Discendente**, sulla quale si basa l'algoritmo **Back-Propagation** (BP) si fonda sull'individuazione, passo passo, della matrice di connessioni che minimizza l'Errore, statico o dinamico, delle RNA:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$$

dove:

$\eta$  = tasso di apprendimento

$E$  = Errore delle RNA

$w_{ij}$  = Matrice delle connessioni delle RNA.

Questa tecnica è applicabile solo quando sia possibile stabilire quale deve essere l'Errore di una RNA in un certo istante. Il criterio per stabilire l'Errore può essere **statico**: l'Output delle RNA deve essere di un certo tipo, quando l'Input è di un altro tipo. Oppure può essere **dinamico**, quando il Target di Output di una RNA muta in accordo a delle condizioni interne che la RNA sta sviluppando durante l'aggiornamento. In entrambi i casi, l'Errore può essere definito in funzione della differenza tra ciò che si **desidera** che la RNA risponda in Output e ciò che **effettivamente** la RNA risponde:

$$(5a) e_i = t_i - u_i$$

dove:  $e_i$  = errore del nodo  $u_i$ , rispetto al valore *Target*  $t_i$ .

### Reti feed-forward

La topologia di connessione dei neuroni delle ANN è determinata dal particolare uso che se ne vuole fare. Nel caso delle reti feed-forward i valori di uscita dipendono solamente dagli ingressi attuali e non dalla storia precedente, al contrario delle reti neurali ricorrenti in cui i valori di uscita dipendono anche dalla evoluzione della rete precedente (ovvero dagli ingressi e dalle uscite negli istanti precedenti).

I neuroni delle ANN sono di solito organizzati a livelli un primo livello di neuroni (*input layer*) che riceve le afferenze sensoriali (o vettori di ingresso), uno o più strati nascosti (*hidden layer*) e uno strato di uscita (*output layer*). Nella maggior parte dei casi ogni neurone di uno strato riceve gli ingressi da tutti i neuroni dello strato precedente, anche perché ancora non esiste una teoria completa sulle reti non totalmente connesse.

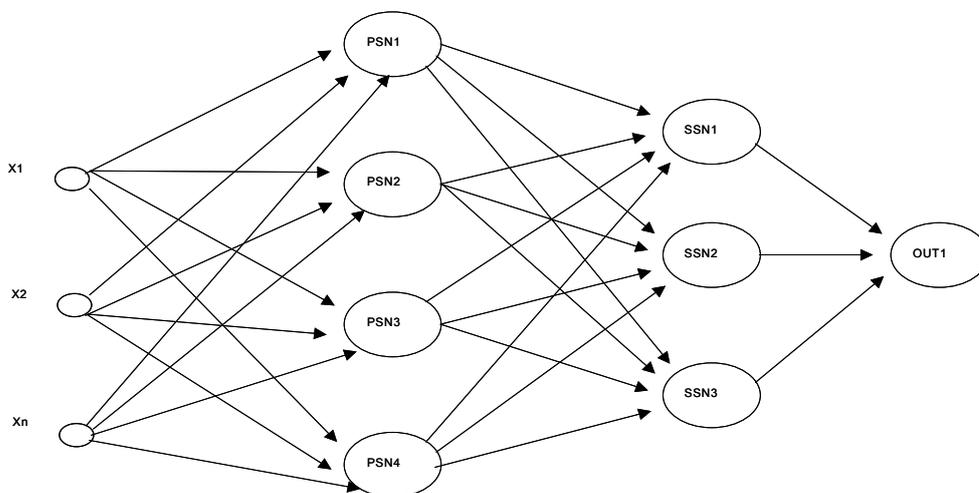


Figura 4.1 : esempio di rete feed-forward con 2 strati *hidden*

In una rete di tipo feed-forward i neuroni prendono il loro input solo dallo strato precedente, ed inviano il loro output solo allo strato seguente. Neuroni dello stesso strato non sono tra loro connessi. A causa di ciò, queste reti, calcolano un risultato molto rapidamente. Non ci sono tempi di ritardo mentre i neuroni interagiscono con se stessi e con gli altri per sistemarsi in uno stato stabile. Un risultato è ottenuto in una rete feed-forward nel seguente modo. Prima i neuroni di input calcolano il loro valore di output basato sul corrente input. Dopo che tutti i neuroni hanno completato simultaneamente questo compito, allora nel successivo strato (intermedio > ognuno dei neuroni calcola il proprio output. Ogni neurone intermedio ottiene il risultato tenendo conto dei segnali provenienti da tutti i neuroni dello strato di input. Infatti il neurone intermedio è collegato con una distinta connessione (dall'appropriato "peso") ad ognuno dei neuroni dello strato di input. In genere, quindi, gli output sono differenti per ognuno dei neuroni intermedi. Quando tutti i neuroni intermedi hanno implementato il loro risultato, quelli di output (o del successivo strato intermedio) calcolano il loro output basando sempre sulla somma pesata dei segnali provenienti da tutti i neuroni intermedi. Dato che ogni neurone deve essere dotato di una connessione diretta (con il relativo "peso") con ognuno dei neuroni dello strato precedente, la rete feed-forward ha bisogno di memorizzare una notevole quantità di pesi (molto meno rispetto alle reti feedback). Se per esempio uno strato ha N neuroni ed il precedente strato ha M neuroni, la connessione tra questi due strati richiederà  $N \cdot M$  parole di memoria (una parola per ogni peso). Quindi anche se questa necessità di memoria è sempre abbastanza gravosa, essa è indispensabile poiché è noto che qualsiasi "conoscenza" memorizzata nella rete neurale è contenuta nella configurazione dei pesi delle connessioni.

### 4.3 Gli algoritmi genetici (GA)

L'algoritmo genetico (GA) è un algoritmo di analisi dei dati e appartiene a una particolare classe di algoritmi utilizzati in diversi campi, tra cui l'intelligenza artificiale. È un metodo euristico di ricerca ed ottimizzazione, ispirato al principio della selezione naturale di Charles Darwin che regola l'evoluzione biologica. Questo tipo di algoritmo è detto genetico perché mutuò terminologia dalla genetica, branca della biologia.

Un tipico algoritmo genetico parte da un certo numero di possibili soluzioni (individui) chiamate popolazione e provvede a farle evolvere nel corso dell'esecuzione: a ciascuna iterazione, esso opera una selezione di individui della popolazione corrente, impiegandoli per generare nuovi elementi della popolazione stessa, che andranno a sostituire un pari numero d'individui già presenti, e a costituire in tal modo una nuova popolazione per l'iterazione (o generazione) seguente. Tale successione di generazioni evolve verso una soluzione ottimale del problema assegnato.

La loro evoluzione viene ottenuta attraverso una parziale ricombinazione delle soluzioni, ogni individuo trasmette parte del suo patrimonio genetico ai propri discendenti, e l'introduzione di mutazioni casuali nella popolazione di partenza, sporadicamente quindi nascono individui con caratteristiche non comprese tra quelle presenti nel corredo genetico della specie originaria.

Finita la fase di evoluzione la popolazione delle soluzioni viene analizzata e vengono tenute solo le soluzioni che meglio risolvono il problema: gli individui con le qualità più adatte all'ambiente in cui si trovano hanno quindi maggiori possibilità di sopravvivere e riprodursi. Queste soluzioni subiranno una nuova fase di evoluzione e così via.

Alla fine ci si aspetta di trovare una popolazione di soluzioni che riescano a risolvere adeguatamente il problema posto. Non vi è modo di decidere a priori se l'algoritmo sarà effettivamente in grado di trovare una soluzione accettabile. Di norma gli algoritmi genetici vengono utilizzati per problemi di ottimizzazione per i quali non si conoscono algoritmi di complessità lineare o polinomiale.

Gli algoritmi genetici sono applicabili alla risoluzione di un'ampia varietà di problemi d'ottimizzazione non indicati per gli algoritmi classici, compresi quelli in cui la funzione obiettivo è discontinua, non derivabile, stocastica, o fortemente non lineare.

La soluzione del problema viene codificata in una struttura, di solito una stringa, detta **gene**. Inizialmente viene creato un certo numero di geni in maniera casuale e si definisce una funzione che restituisca la "bontà" di un gene come soluzione del problema, detta funzione di *fitness*. L'algoritmo consiste nell'applicazione di operazioni, che tendono a modificare la popolazione dei geni, nel tentativo di migliorarli in modo da ottenere una soluzione sempre migliore. L'evoluzione procede quindi in passi, per ognuno di questi viene per prima cosa eseguito un ordinamento dei geni sulla base del risultato della funzione di *fitness*. Vengono poi eseguite le operazioni su un numero di geni stabilito dai parametri dell'algoritmo, che in generale determinano quanti geni devono subire *crossover* e mutazioni, e in quale misura.

L'algoritmo evolve quindi attraverso i seguenti punti:

- generazione, in maniera casuale, una popolazione iniziale;
- creazione di una sequenza di nuove popolazioni, o generazioni. In ciascuna iterazione, gli individui della popolazione corrente sono usati per creare la generazione successiva, e a questo scopo si compiono degli ulteriori passi:
  - ciascun membro della popolazione corrente è valutato calcolandone il rispettivo valore di *fitness* (idoneità);
  - si determina un opportuno ordinamento di tali individui sulla base dei valori di *fitness*;
  - gli individui più promettenti sono selezionati come genitori;
  - a partire da tali individui si genera un pari numero di individui della generazione successiva, e ciò può avvenire secondo due modalità distinte, vale a dire effettuando cambiamenti casuali su un singolo genitore (mutazione) oppure combinando opportunamente le caratteristiche di una coppia di genitori (incrocio);
  - gli individui così generati vanno a sostituire i genitori consentendo la formazione della generazione successiva;
- infine, l'algoritmo s'interrompe quando uno dei criteri d'arresto è soddisfatto.

### Crossover

In base a un coefficiente stabilito inizialmente, alcune parti dei geni risultati migliori vengono scambiate, nell'ipotesi che questo possa migliorare il risultato della funzione di *fitness* nel successivo "passo evolutivo".

Ci sono varie tecniche di crossing over. Una delle più semplice è la "*single point crossing over*" che consiste nel prendere due individui e tagliare le loro stringhe di codifica in un punto a caso. Si creano così due teste e due code. A questo punto si scambiano le teste e le code, ottenendo due nuovi geni. Il crossing over non è applicato sempre, ma con una probabilità  $p_c$ . Nel caso in cui non viene applicato i figli sono semplicemente le copie dei genitori.

Sperimentalmente si può vedere che il miglioramento diventa apprezzabile solo dopo un certo numero di passi. Questo a meno di casi fortunati, ovviamente.

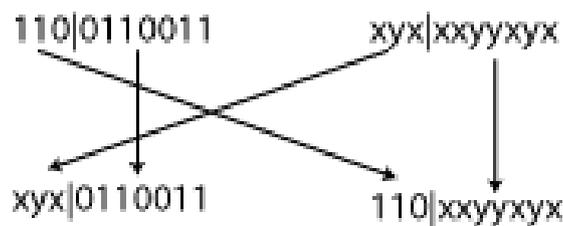


Figura 4.2 : Single point crossover

### Mutazione

La mutazione consiste nella modifica casuale di alcune parti dei geni con valore di *fitness* più basso, in base a coefficienti definiti inizialmente. Queste modifiche puntano a migliorare il valore della funzione per il gene in questione.

In realtà non è corretto pensare di mutare solo i cromosomi con *fitness* più bassa; al fine di garantire una maggiore capacità esplorativa dell'algoritmo (e non finire in "buche" di ottimo locale) sono ritenute utili anche le mutazioni di cromosomi con valore di *fitness* alto. In definitiva le mutazioni servono soprattutto a esplorare lo spazio di ricerca, non hanno quindi scopo migliorativo.

## 4.4 Approcci ibridi

### Sistemi cooperativi (Ensembling)

La famiglia di sistemi cooperativi *neural-fuzzy* si differenzia dalle reti NeuroFuzzy, ove reti neurali e sistemi fuzzy sono strettamente integrati e fusi tra loro, in quanto i diversi modelli sono parti cooperanti ma distinte all'interno di una determinata applicazione. L'architettura che un tale sistema può assumere non è definibile a priori come l'architettura ANFIS, bensì è funzione dell'applicazione che si vuole realizzare.

La cooperazione tra reti neurali e sistemi fuzzy è in realtà inquadrabile all'interno di un approccio più ampio che trae ispirazione da un principio della fisica teorica noto come 'Teoria del *Bootstrap*'. In tale teoria si propone di utilizzare tutti i modelli a disposizione che descrivono un fenomeno ed integrarli tra loro costruendo un sistema di modelli cooperanti che sia in grado ottenere il meglio nelle differenti situazioni.

In tale approccio l'attenzione della ricerca si sposta quindi dai modelli alla relazione tra modelli in modo tale da sfruttare al meglio la loro 'bio-diversità'.

Nel caso particolare dei sistemi neural-fuzzy ciò che diventa importante è quindi la relazione che intercorre tra i modelli neurali e fuzzy all'interno della specifica applicazione.

Un esempio di come applicare l'approccio cooperativo utilizzando reti neurali e logica fuzzy è quello di integrare modelli fisici o euristici e reti neurali utilizzando un decisore di basato su logica sfumata.

In questa applicazione la relazione fondamentale tra i vari moduli è la complementarità tra modelli fisici/euristici e reti neurali. I primi infatti hanno come vantaggio principale quello di essere scalabili a differenti condizioni e come svantaggio quello di non cogliere gli aspetti altamente non lineari del fenomeno mentre le seconde spesso riescono a cogliere gli aspetti altamente non lineari ma questi risultati non sono scalabili fuori dal training set.

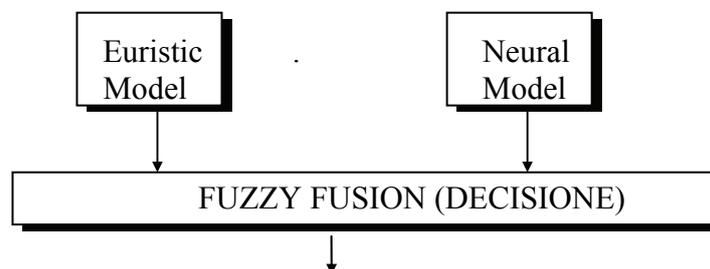


Figura 4.3 : sistemi cooperativi (ensembling)

### Neuroevoluzione (Reti Neurali Evolutive - ENN)

Si denota col termine *neuroevoluzione* (o *reti neurali evolutive*) l'uso degli algoritmi genetici, o di altri metodi e tecniche evolutive, nella messa a punto delle reti neurali artificiali, per quanto riguarda sia l'architettura della rete (cioè la sua struttura intesa come numero di nodi e numero di connessioni tra i nodi stessi), sia i parametri relativi (ossia i pesi delle connessioni tra i nodi).

In tale caso il genotipo di ciascuno individuo codificherà i pesi e le funzioni di trasferimento dei nodi della rete.

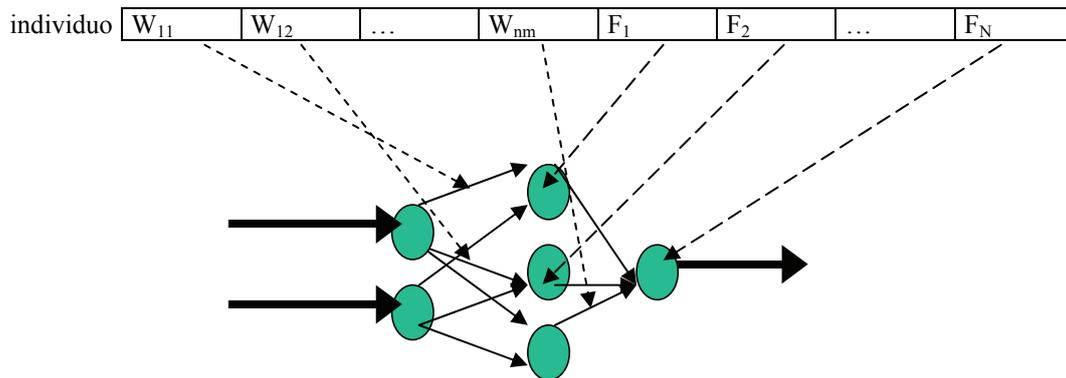


Figura 4.4 : rete neurale evolutiva

### Back-Propagation ed Algoritmi Genetici (BPGA)

L'algoritmo Back-Propagation (BP) e quelli genetici (GA) hanno entrambi meriti e svantaggi nell'addestramento di reti neurali (Neuroevoluzione).

Il BP è un algoritmo basato sul principio del gradiente discendente usato per trovare i valori dei pesi della rete in modo tale da minimizzare l'errore tra stima e valore atteso. Il merito maggiore di questa tecnica consiste nel fatto che l'aggiustamento dei pesi avviene sempre verso la direzione discendente della funzione d'errore. Lo svantaggio di questa tecnica è che si tratta essenzialmente di una ricerca locale e quindi se la curva dell'errore è piuttosto complessa con numerosi minimi locali, allora l'algoritmo può facilmente rimanere intrappolato in uno di tali minimi.

I GA sono algoritmi stocastici di ottimizzazione parallela, per cui non risentono del problema dei minimi locali. Lo svantaggio di questa tecnica sta nella sua natura stocastica e nella lentezza che è dovuta essenzialmente dalla inizializzazione casuale dei geni.

Da quanto detto è facile notare la complementarietà dei due algoritmi. In questo contesto abbiamo sviluppato un approccio ibrido (BPGA) che combina i due metodi in modo tale che il BP viene prima usato per addestrare un piccolo numero di reti neurali, quindi le soluzioni trovate vengono codificate direttamente all'interno dei cromosomi di una popolazione iniziale di cromosomi casuali. Da questa popolazione, parte casuale e parte inizializzata con il BP, il GA viene eseguito per un certo numero di generazioni.

Il vantaggio di questo approccio consiste nel fatto che, come dimostreranno i risultati sperimentali, il BP fornisce alcuni utili 'suggerimenti' al GA (riducendone drasticamente il tempo di convergenza) ed il GA dal canto suo aiuta il BP ad uscire dai minimi locali.

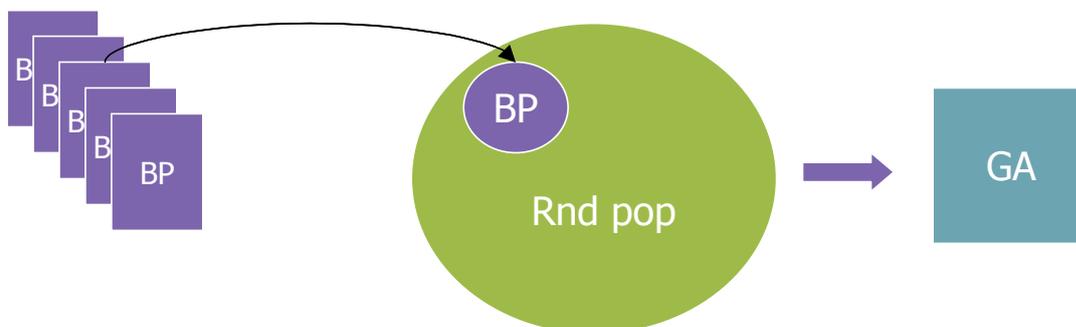


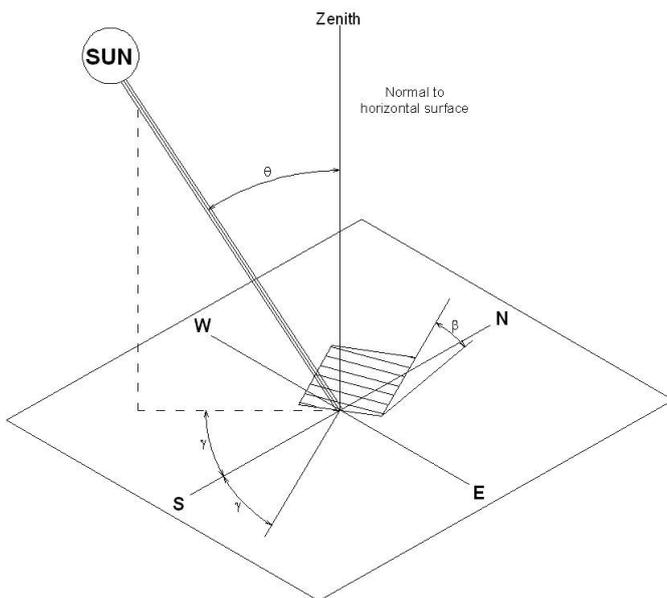
Figura 4.5 : approccio BPGA per addestramento ibrido di reti neurali

## 4.5 La radiazione solare

I valori di radiazione al suolo sono soggetti a considerevoli incertezze derivanti da condizioni climatiche locali. I fattori che influenzano l'intensità della radiazione al suolo sono essenzialmente l'attenuazione dovuta all'atmosfera e l'effetto dell'orientazione della superficie ricevente.

La radiazione è composta da due componenti: la radiazione diretta che proviene dal sole senza che abbia subito alcuna deviazione; e la radiazione diffusa che arriva sulla superficie dopo che la sua direzione ha subito una variazione in un processo di riflessione o diffusione da parte dell'atmosfera.

La relazione geometrica fra un piano comunque orientato rispetto alla terra e la direzione della radiazione solare diretta incidente, può essere scritta in funzione del tempo mediante relazioni trigonometriche in cui compaiono diversi angoli.



$\phi$  = latitudine (positiva se nord).

$\delta$  = declinazione (posizione angolare del sole rispetto al piano dell'equatore, a mezzogiorno solare; positiva verso nord).

$\beta$  = angolo fra il piano orizzontale e quello considerato (inclinazione del piano).

$\gamma$  = angolo azimutale della superficie, cioè deviazione della normale alla superficie dal meridiano locale (zero se la superficie è orientata verso l'equatore, positivo verso est, negativo verso ovest).

$\omega$  = angolo orario, preso zero a mezzogiorno solare e pari a  $15^\circ$  per ogni ora, positivo verso mattina e negativo verso il pomeriggio.

$\theta$  = angolo di incidenza della radiazione

diretta, misurato fra la direzione di propagazione della radiazione e la normale alla superficie.

Si definiscono anche:

$\theta_z$  = angolo zenitale, cioè l'angolo che la radiazione diretta forma con la verticale.

$\alpha$  = altitudine solare: angolo che la radiazione diretta forma con l'orizzontale ( $90^\circ - \theta_z$ ).

I valori della radiazione totale giornaliera intermedi fra quelli caratteristici di una giornata serena e di una giornata completamente nuvolosa possono essere generati da circostanze diverse che non possono essere determinate a partire dalla stessa radiazione giornaliera. Tuttavia il metodo esposto va bene per i giorni sereni, che sono rilevanti perchè questi giorni forniscono la maggior parte dell'energia.

Studi statistici della distribuzione temporale della radiazione totale su superfici orizzontali durante il giorno, usando dati medi, hanno portato alla elaborazione di curve generali che rappresentano il rapporto fra la radiazione totale oraria e quella totale giornaliera in funzione della durata del giorno considerato e nell'ora in questione. La rappresentazione analitica di tali curve è data dalla seguente formula (Collares - Perreira e Rabl, 1979):

$$r_t = \pi/24 (a + b \cos \omega)(\cos \omega + \cos \omega_s) / [\sin \omega_s - (2\pi\omega_s/360)\cos \omega_s]$$

Si può definire l'indice di limpidezza medio mensile, giornaliero ed orario, che è il rapporto fra la radiazione su una superficie orizzontale e la radiazione extra-atmosferica, indicato rispettivamente con  $\bar{K}_T$ ,  $K_T$  e  $k_T$ .

La radiazione totale può inoltre essere separata nelle componenti diretta e diffusa. Orgill e Holland (1977) hanno usato dati provenienti da osservatori canadesi per correlare  $I_d/I$  cioè il rapporto tra la radiazione diffusa e la radiazione totale, e l'indice di limpidezza orario. Le equazioni per la correlazione sono:

$$I_d/I = \begin{matrix} 1.0 - 0.249k_T & \text{per } k_T < 0.35 \\ 1.557 - 1.84k_T & \text{per } 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177 & \text{per } k_T > 0.75 \end{matrix}$$

Per una superficie inclinata di un angolo  $\beta$  si possono trovare le componenti diretta e diffusa (dal cielo e dal paesaggio) attraverso la formula ricavata da Liu e Jordan (1963).

#### 4.6 La temperatura ambientale

Per ricavare i valori orari di temperatura ambiente e la sua deviazione standard è richiesto l'uso di relazioni su base oraria. Dal modello neurale sono disponibili valori giornalieri ed è necessario stimare i valori orari dalle medie giornaliere.

L'escursione di temperatura in un giorno varia sostanzialmente al variare dei mesi in una stessa località, ed è anche variabile nello stesso periodo per località differenti.

La variazione di temperatura è data da:

$$\bar{T}_h - \bar{T} / A = 0.4632 \cos(t^* - 3.805) + 0.0984 \cos(2t^* - 0.36) + 0.0168 \cos(3t^* - 0.822) + 0.0138 \cos(4t^* - 3.513)$$

dove  $\bar{T}_h$  è la temperatura oraria ambiente,  $\bar{T}$  è la temperatura media giornaliera data dal modello neurale,  $A = 25,8K_T - 5,21$  è l'ampiezza della variazione (picco-picco) e  $t^*$  è  $t^* = 2\pi(t-1)/24$ , dove  $t$  è l'ora del giorno da 1 a 24.

Se  $\bar{T}$  ed  $A$  sono conosciute, per l'equazione precedente può essere usata per trovare la temperatura per ogni ora.

#### 4.7 Sperimentazione

La sperimentazione ha riguardato lo sviluppo di modelli basati sulle metodologie sopra esposte (par. 4.2, 4.3, 4.4) per la stima della radiazione solare e della temperatura ambientale. In particolare sono stati sviluppati e confrontati i seguenti approcci :

- algoritmo “*Nearest Neighbor* (NN)”, che consiste nell’assegnare il dato di ogni località, teoricamente sconosciuta, con quella della località più vicina nel training set.
- reti neurali basate su algoritmi di addestramento
  - back-propagation (BPNN)
  - evolutivi (ENN)
  - ibridi (BPGANN)
- sistemi cooperativi (ensembling) che combinano reti neurali ed algoritmo NN tramite logica sfumata

I dati sono stati presi dall’atlante solare sviluppato dall’ENEA e sono disponibili sia in forma cartacea che digitale presso l’indirizzo <http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/Index.htm>  
L’intero sistema, il Neural Weather Generator (NWG), è stato implementato in simulink.

I risultati sono stati validati sia facendo un confronto con i dati reali che con altri software di simulazione come Trnsys.

Gli input per tutti i modelli neurali sono sempre :

- latitudine
- longitudine
- altitudine
- giorno dell'anno

poiché tali dati risultano essere la massima informazione sempre disponibile per ogni località.

### La radiazione solare

Per la fase di addestramento sono stati presi i dati corrispondenti alle 109 province italiane più Aosta (la Valle d'Aosta non ha province). Per ogni provincia si hanno a disposizione 12 dati (le medie mensili). Per il testing sono stati prese le medie mensili corrispondenti ad alcuni dei comuni italiani: ne sono stati scelti 50 in tutta l'Italia in modo casuale.

Per la radiazione si sono ottenuti risultati soddisfacenti utilizzando solamente il modello ENN. I risultati ottenuti sono sui valori di energia cumulata annua (tabella 4.1) mettendo a confronto i valori reali, le stime dell'NWG e quelle di Trnsys su tre città campione (nord, centro e sud) dai comportamenti climatici molto diversi. In figura 4.6 vi è una comparazione grafica di tali risultati, mentre in figura 4.7 viene riportato l'andamento orario per le 3 componenti della radiazione per una parete esposta a sud nella città di Roma.

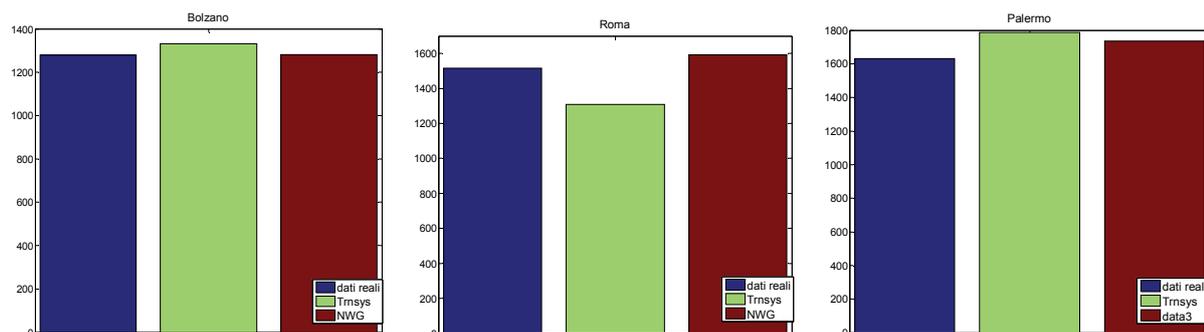


Figura 4.6: energia cumulata annua per Bolzano, Roma e Palermo.

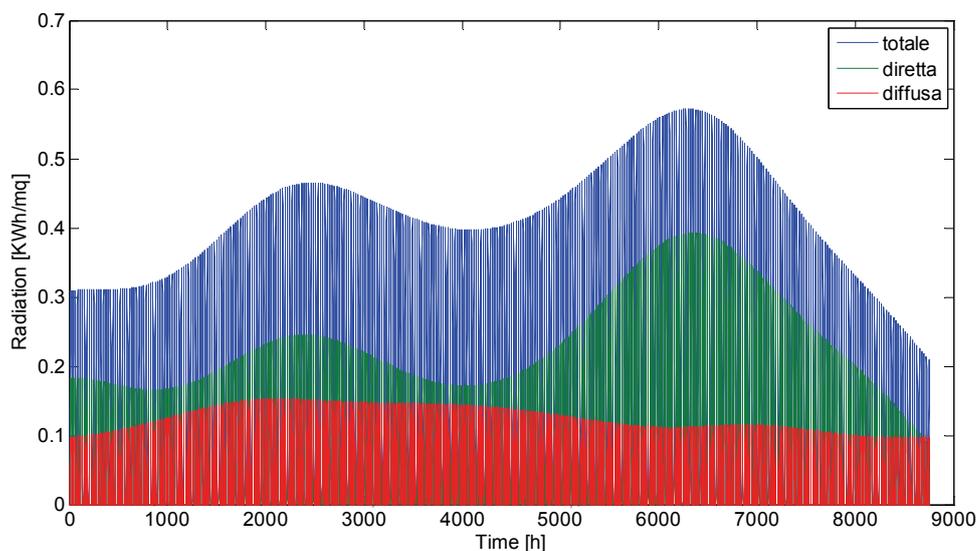


Figura 4.7: andamento orario di radiazione ottenuto a Roma per una parete esposta a sud.

|              | reale | NWG  | Trnsys | Errore assoluto NWG | Errore assoluto Trnsys | Errore relativo NWG | Errore relativo Trnsys |
|--------------|-------|------|--------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| Bolzano      | 1280  | 1282 | 1332   | 2                   | 52                     | 0.2%                | 4.1%                   |
| Roma         | 1516  | 1594 | 1309   | 77                  | 208                    | 5.1%                | 13.7%                  |
| Palermo      | 1631  | 1735 | 1786   | 103                 | 155                    | 6.3%                | 9.5%                   |
| <b>MEDIA</b> |       |      |        | <b>61</b>           | 138                    | <b>3.9%</b>         | 9.1%                   |

Tabella 4.1: comparazione risultati ottenuti da un modello neurale globale per tutta l'Italia (radiazione totale)

Da tali risultati si può notare come il NWG abbatta di oltre il 50% l'errore di stima di metodi tradizionali (Trnsys) mantenendo l'errore di stima a livelli più che accettabili. Anche la figura 4.7 mostra un profilo orario della radiazione assai realistico. La bontà del risultato conseguito era altresì facilmente prevedibile, in quanto per la radiazione solare i dati a disposizione (coordinate geografiche più giorno dell'anno) sono sufficienti a modellare il fenomeno con buona precisione. Tali risultati sono importanti perché ci permettono di avere un modello di stima della radiazione dotato di buona precisione ma al tempo stesso semplice (1 unico modello neurale per tutta l'Italia) e veloce nel calcolo. Tale caratteristica rende tale modello uno strumento ottimale per gli scopi della progettazione di edifici eco-sostenibili e quindi il modello ENN è stato integrato nella piattaforma ODESSE.

#### La temperatura ambientale : stima valori medi mensili

Come nel caso della radiazione, la prima sperimentazione ha riguardato lo sviluppo di una rete neurale globale per la modellazione della temperatura su tutto il territorio nazionale.

|          | Errore medio | Errore max  |
|----------|--------------|-------------|
| Training | <b>0.73</b>  | <b>7.25</b> |
| Testing  | <b>1.25</b>  | <b>6.35</b> |

Tabella 4.2: risultati ottenuti da un modello neurale globale per tutta l'Italia (°C)

Tale risultato è sicuramente insoddisfacente ma utile per avere un riferimento sul quale sviluppare i modelli successivi.

Questo lo ci si poteva aspettare in quanto il profilo di temperatura del territorio italiano è altamente non lineare (figura 4.8 a destra) ed influenzato da fenomeni locali (es. vento, pressione, umidità, presenza di montagne, etc.) che spesso non sono misurati o misurabili.

Quindi si è proceduto ad una partizione del data set secondo aree climatiche. Questo passaggio si è rivelato particolarmente delicato e laborioso a causa della già menzionata complessità del profilo di temperatura del territorio italiano e poiché il test set, per essere un banco di prova valido e coerente, deve contenere punti rappresentativi del training set.

|               | Regioni                                     | Training set (località) | Test set (località) |
|---------------|---|-------------------------|---------------------|
| Area1         | V.dAosta, Piemonte, Lombardia               | 76                      | 17                  |
| Area2         | TrentinoAA, Veneto, FriuliVG, EmiliaRomagna | 161                     | 18                  |
| Area3         | Liguria, Toscana, Umbria                    | 90                      | 11                  |
| Area4         | Marche, Abruzzo                             | 43                      | 13                  |
| Area5         | Lazio, Campania                             | 71                      | 9                   |
| Area6         | Puglia, Molise                              | 66                      | 8                   |
| Area7         | Basilicata, Calabria                        | 53                      | 6                   |
| Area8         | Sardegna                                    | 36                      | 5                   |
| Area9         | Sicilia                                     | 47                      | 10                  |
| <b>TOTALE</b> | <b>20</b>                                   | <b>643</b>              | <b>97</b>           |

Tabella 4.3: partizionamento dati

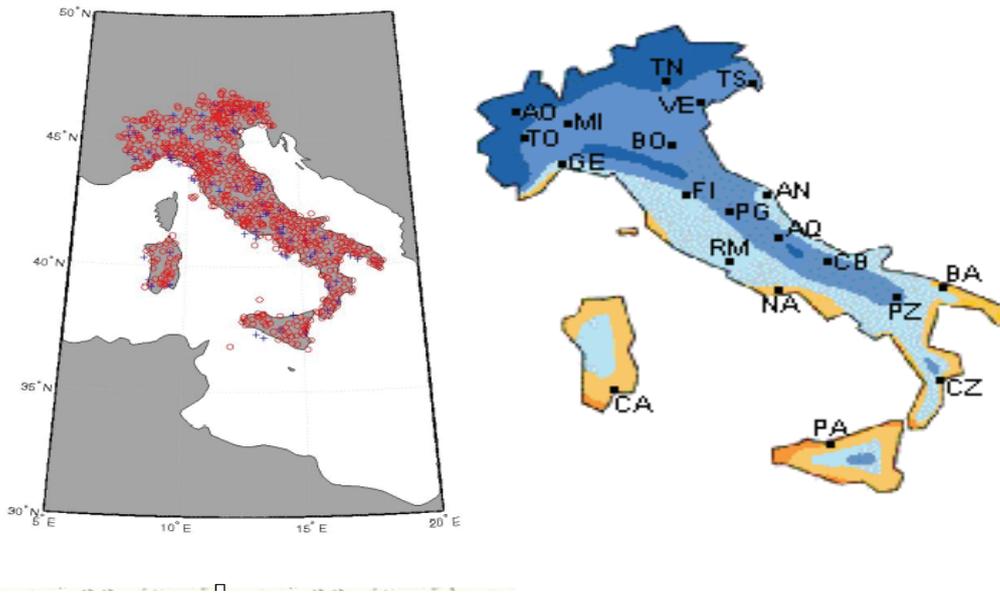


Figura 4.8 : distribuzione training-testing set (train: rosso, test:blu) e profili medi di temperatura

In una prima fase la sperimentazione si è focalizzata maggiormente sulla zona Marche-Abruzzo in quanto presenta elevate non linearità (località vicine che hanno temperature molto diverse) ed in quanto, per realizzare dei modelli con un basso errore in assenza di informazioni importanti (es. vento, umidità, etc.) sul fenomeno in questione, bisogna necessariamente scendere a modelli locali. Quindi, per lo sviluppo di modelli locali affidabili, per la zona di interesse sono stati sviluppati un modello ‘globale’ regionale, due opportuni sotto-modelli (fig. 4.9) e sono state provate alcune strategie di ensembling.

Le strategie di ensembling sviluppate sono state le seguenti :

- Media sui due sotto-modelli (avg2)
- Media sui due sotto-modelli + il modello ‘globale’ della zona (avg3)
- Ensembling a regole sui due sotto-modelli (ens2)
- Ensembling a regole sui due sotto-modelli + il modello ‘globale’ della zona (ens3)
- Ensembling neurale sui due sotto-modelli + il modello ‘globale’ della zona (neural\_ens)
- Ensembling neurale sui due sotto-modelli + il modello ‘globale’ della zona + un modello neurale che classifica l’affidabilità del modello ‘globale’ regionale (ens3\_nc)

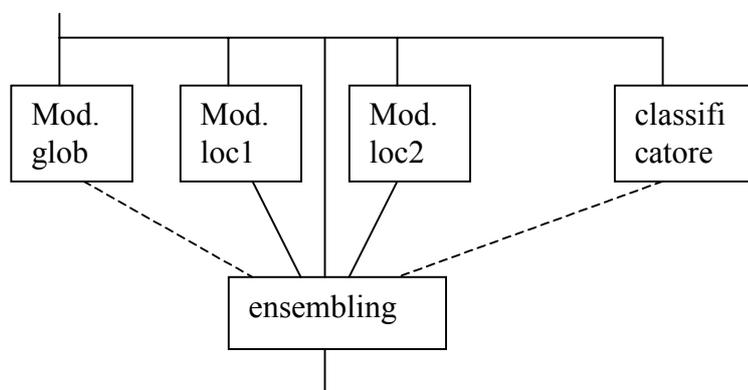


Figura 4.9 : architettura di ensembling

L’ensembling a regole si basa sull’individuazione delle zone in cui ciascun modello lavora *globalmente* meglio, ovvero intersecando le ‘zone di *affidabilità*’ di training e testing in modo tale da applicare sempre le stesse regole.

Di seguito (tab. 4.4) vengono riportati i risultati ottenuti in testing paragonando le varie tecniche di

ensembling con il modello globale di zona e gli errori teorici ottenibili qualora si avesse a disposizione ‘ *l’oracolo perfetto* ’, ovvero se si potesse sapere a priori in ogni situazione qual’è il modello migliore nel caso dei due sotto-modelli ed in quello di questi più il modello globale zonale. In testing è stata applicata anche la strategia del ‘ *Nearest Neighbor* (NN)’, ovvero considerare come stima i valori di temperatura della località più vicina nota in training. Come si può notare NN commette un errore medio basso ma a volte commette errori macroscopici, cosa che non avviene per i modelli neurali. Quindi sono stati considerati altri due oracoli (Or4=Or3+NN e Or2nn=Zonale+NN) e, siccome la differenza tra Or4 ed Or2nn è poco significativa (l’ensembling tra modelli neurali diversi migliora in maniera piccola le performance in rapporto alla complessità dell’architettura), è stata realizzata anche una quarta strategia di ensembling (Ens4) tra il modello zonale e NN considerando il seguente criterio :

$$\text{Ens4} = \text{NN se } |\text{NN-Zonale}| < \theta$$

Zonale altrimenti

Ove in questo caso  $\theta=2.5$ .

|            | Zonale | Avg2 | Avg3 | Ens2 | Ens3 | Neural_ens | Ens3_nc | NN  | Ens4       | Or2        | Or3        | Or4         | Or2nn       |
|------------|--------|------|------|------|------|------------|---------|-----|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Err. medio | 0.8    | 1.1  | 0.9  | 0.9  | 0.8  | 1.1        | 1.0     | 1.0 | <b>0.5</b> | <b>0.7</b> | <b>0.5</b> | <b>0.32</b> | <b>0.38</b> |
| Err. max   | 2.4    | 2.9  | 2.2  | 2.2  | 2.0  | 2.9        | 2.4     | 6.5 | <b>1.5</b> | <b>2.0</b> | <b>1.3</b> | <b>1.1</b>  | <b>1.1</b>  |

Tabella 4.4: risultati test °C

Da questi risultati iniziali si possono trarre le seguenti considerazioni :

- per ottenere modelli affidabili della temperatura ambientale bisogna sviluppare modelli locali sia nello spazio che nel tempo (stagioni);
- il modello zonale nell’ensembling in generale aiuta;
- l’ensembling su diversi modelli neurali dà un miglioramento che è poco significativo rispetto alla complessità dell’architettura ;
- la strategia che dà i migliori risultati (contenendo l’errore massimo a 1,5°C in testing) è quella che utilizza una semplice composizione tra modello neurale zonale e strategia NN.

Successivamente è stato esteso l’approccio ibrido NN + rete neurale alla stagione invernale e su tutto l’anno. Inoltre è stato provato anche un ensembling fuzzy. Nella tabella 4.5 vengono riportati gli errori assoluti medi e, tra parentesi, massimi commessi dai seguenti approcci :

- NN = Nearest Neighbor (località più vicina)
- RN = Rete Neurale
- Hens = Hard ensembling (con soglia a scalino)
- Fens = Fuzzy ensembling (soglia sfumata)
- Teor = errore teorico (giudice perfetto con conoscenza a priori degli errori commessi dai singoli modelli)

|         | NN         | RN          | Hens        | Fens        | Teor        |
|---------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Estate  | 1.53 (8.4) | 0.82 (2.92) | 0.54 (1.5)  | 0.59 (1.45) | 0.45 (1.22) |
| Inverno | 1.46 (6.9) | 0.73 (2.02) | 0.68 (1.6)  | 0.63 (1.6)  | 0.5 (1.52)  |
| Anno    | 1.5 (8.4)  | 0.77 (2.21) | 0.67 (2.21) | 0.63 (2.26) | 0.49 (2.21) |

Tabella 4.5: risultati test (marche-abruzzo) °C

Ove Hens e Fens sono calcolati rispettivamente

$$\text{Hens}(x) = \begin{cases} \text{NN}(x) & \text{se } |\text{NN}(x) - \text{RN}(x)| < \theta \\ \text{RN}(x) & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$\text{Fens} = \mu(x) * \text{NN} + (1 - \mu(x)) * \text{RN}$$

Ovvero, è stato definito un *fuzzy set*, che definisce l'affidabilità del NN in funzione della distanza dal modello neurale (che viene usato in sostanza da benchmark per il NN), la cui funzione di membership è un sigmoide inverso definito come

$$\mu(x) = 1 - 1 / (1 + e^{(c-x)/t}), \quad x = |\text{NN}(x) - \text{RN}(x)|$$

Dai risultati si può notare che un modello globale su tutto l'anno è, come rilevato anche in altre sperimentazioni, meno performante dei due modelli stagionali estate-inverno.

L'ensembling fuzzy fornisce dei risultati analoghi a quello hard, comunque sarebbe da preferire in quanto le soglie rigide sono sempre a rischio di errori maggiori.

Successivamente questo approccio è stato applicato a tutte le aree identificate (tab. 4.3) ed è stato comparato con le seguenti metodologie :

- Nearest Neighbor (NN)
- Reti neurali addestrate con algoritmi genetici (GA)
- Reti neurali addestrate con algoritmi Back-Propagation (BP)
- Reti neurali addestrate con algoritmo ibrido (BPGA)
- Ensembling fuzzy tra NN e BP (EnsNNBP)
- Ensembling fuzzy tra NN e BPGA (EnsNNBPGA)

Nelle due seguenti tabelle vi è la comparazione dei risultati in valore medio e massimo fra le varie metodologie. I test sui modelli neurali si riferiscono alla media su 10 run, pertanto tra parentesi vi sono anche i valori delle deviazioni standard.

Nella figura 4.10 viene riportato a titolo di esempio una comparazione grafica della previsione fatta tra il modello NN e BPGA con i valori reali su cinque località di testing della Sicilia (area 9) durante tutto l'anno.

# Risultati

|               | NN          | GA                   | BP                  | BPGA                 | EnsNNBP     | EnsNNBPGA   |
|---------------|-------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------|-------------|
| area1_est     | 1.62        | 0.94(± 0.06)         | 0.78(± 0.15)        | 0.63(± 0.01)         | 0.78        | <b>0.62</b> |
| area1_inv     | 1.07        | 1.38(± 0.05)         | 0.82(± 0.15)        | <b>0.62</b> (± 0.01) | 0.83        | 0.80        |
| area2_est     | 1.70        | 0.99(± 0.15)         | 0.72(± 0.18)        | 0.65(± 0.02)         | 0.63        | <b>0.62</b> |
| area2_inv     | 1.24        | 1.25(± 0.10)         | 1.00(± 0.18)        | 0.66(± 0.01)         | 0.88        | <b>0.69</b> |
| area3_est     | 0.90        | <b>0.65</b> (± 0.03) | 1.57(± 0.30)        | 0.80(± 0.05)         | 0.85        | 0.70        |
| area3_inv     | 0.95        | 0.96(± 0.10)         | 0.67(± 0.40)        | <b>0.68</b> (± 0.02) | 0.70        | 0.65        |
| area4_est     | 1.00        | 2.75 (± 0.10)        | 0.82(± 0.04)        | 0.73(± 0.01)         | <b>0.53</b> | 0.64        |
| area4_inv     | 1.00        | 1.20(± 0.05)         | 0.75(± 0.04)        | <b>0.88</b> (± 0.02) | 0.71        | 0.72        |
| area5_est     | 1.65        | 0.73(± 0.10)         | 0.62(± 0.02)        | <b>0.43</b> (± 0.01) | 0.59        | 0.50        |
| area5_inv     | 1.52        | 0.81(± 0.10)         | 0.57(± 0.02)        | <b>0.38</b> (± 0.01) | 0.60        | 0.60        |
| area6_est     | 1.24        | 0.79(± 0.11)         | 0.64(± 0.08)        | <b>0.59</b> (± 0.01) | 0.73        | 0.61        |
| area6_inv     | 1.32        | 0.90(± 0.15)         | 0.79(± 0.06)        | <b>0.74</b> (± 0.01) | 0.74        | 0.76        |
| area7_est     | 1.33        | 0.90(± 0.05)         | 0.55(± 0.20)        | <b>0.48</b> (± 0.05) | 0.45        | 0.45        |
| area7_inv     | 1.23        | 1.21(± 0.10)         | 0.94(± 0.20)        | 0.85(± 0.03)         | <b>0.89</b> | 0.84        |
| area8_est     | <b>0.46</b> | 0.73(± 0.10)         | 0.60(± 0.39)        | 0.53(± 0.02)         | 0.46        | 0.46        |
| area8_inv     | 0.83        | 0.94(± 0.10)         | 1.38(± 0.39)        | 0.55(± 0.05)         | 0.59        | <b>0.53</b> |
| area9         | 3.11        | 1.88 (± 0.60)        | 1.10(± 0.09)        | 0.50(± 0.02)         | 0.56        | <b>0.48</b> |
| <b>Totale</b> | <b>1.30</b> | <b>1.12(± 0.12)</b>  | <b>0.86(± 0.17)</b> | <b>0.62(± 0.02)</b>  | <b>0.67</b> | <b>0.62</b> |

Tabella 4.6: risultati test (errore medio °C)

# Risultati

|               | NN          | GA                   | BP                   | BPGA                 | EnsNNBP     | EnsNNBPGA   |
|---------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|
| area1_est     | 8.70        | 2.78 (± 0.20)        | 2.30 (± 0.60)        | 2.00 (± 0.03)        | <b>1.95</b> | 2.00        |
| area1_inv     | 7.20        | 3.50 (± 0.20)        | 2.73 (± 0.60)        | 2.73 (± 0.02)        | <b>2.40</b> | <b>2.40</b> |
| area2_est     | 6.80        | 2.55 (± 0.40)        | 1.82 (± 0.70)        | 2.05 (± 0.05)        | <b>1.74</b> | 2.05        |
| area2_inv     | 6.80        | 5.10 (± 0.30)        | 2.90 (± 0.60)        | 2.40 (± 0.1)         | 2.59        | <b>2.30</b> |
| area3_est     | 3.50        | 2.24 (± 0.10)        | 3.76 (± 0.80)        | 2.50 (± 0.05)        | 2.57        | <b>1.95</b> |
| area3_inv     | 3.30        | 3.66 (± 0.10)        | 2.15 (± 0.80)        | 2.10 (± 0.10)        | <b>1.97</b> | 2.10        |
| area4_est     | 4.20        | 5.40 (± 0.15)        | 2.92 (± 0.06)        | 1.62 (± 0.02)        | <b>1.30</b> | 1.63        |
| area4_inv     | 3.80        | 3.83 (± 0.40)        | 3.05 (± 0.08)        | 2.77 (± 0.02)        | 2.04        | <b>1.80</b> |
| area5_est     | 3.90        | 1.53 (± 0.10)        | 1.33 (± 0.15)        | 1.20 (± 0.10)        | 1.33        | <b>1.10</b> |
| area5_inv     | 4.40        | 2.63 (± 0.12)        | 1.60 (± 0.10)        | 1.55 (± 0.05)        | 1.60        | 1.55        |
| area6_est     | 3.40        | 2.73 (± 0.11)        | 1.75 (± 0.40)        | 1.63 (± 0.02)        | 1.79        | 1.90        |
| area6_inv     | 4.00        | 2.60 (± 0.25)        | 2.54 (± 0.40)        | 2.32 (± 0.02)        | 2.32        | 2.32        |
| area7_est     | 3.20        | 2.44 (± 0.10)        | 1.30 (± 0.40)        | 1.40 (± 0.10)        | <b>1.18</b> | 1.40        |
| area7_inv     | 2.70        | 2.74 (± 0.25)        | 2.02 (± 0.30)        | 1.65 (± 0.15)        | 2.02        | 1.65        |
| area8_est     | <b>1.20</b> | 1.92 (± 0.20)        | 1.90 (± 0.40)        | 1.75 (± 0.05)        | 1.20        | 1.20        |
| area8_inv     | 3.00        | 3.14 (± 0.10)        | 2.57 (± 0.30)        | 1.70 (± 0.10)        | <b>1.50</b> | 1.70        |
| area9         | 9.10        | 5.10 (± 1.50)        | 1.87 (± 0.47)        | 1.77 (± 0.02)        | <b>1.21</b> | 1.25        |
| <b>Totale</b> | <b>9.10</b> | <b>5.40 (± 0.27)</b> | <b>3.76 (± 0.42)</b> | <b>2.77 (± 0.06)</b> | <b>2.59</b> | <b>2.40</b> |

Tabella 4.7: risultati test (errore massimo °C)

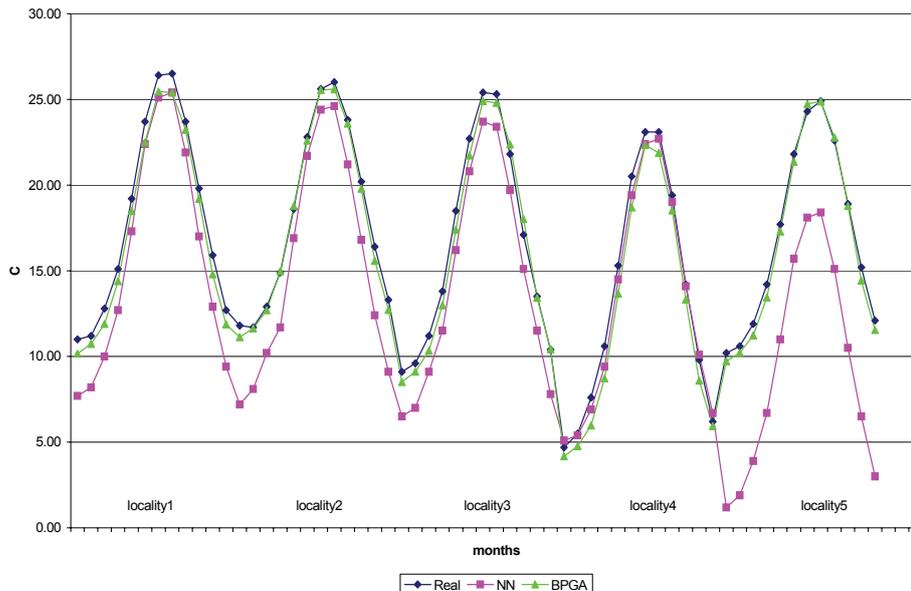


Figura 4.10 : comparazione segnali area 9(testing)

Da questi risultati è interessante notare (fig.4.10, località 5) come l'approccio comunemente usato NN possa essere causa di errori molto elevati e che le performance migliori sono quelle degli algoritmi BPGA ed ensembling fuzzy. Tra questi, a parità di prestazioni, è preferibile il primo poiché ha un architettura concettuale più semplice.

Il successo dell'algoritmo BPGA risulta particolarmente significativo sia in termini di errore commesso che in termini di deviazione standard. Quest'ultima infatti, comparata con le tecniche BP e GA, risulta particolarmente bassa e ciò è particolarmente importante poiché indica l'effettiva affidabilità, precisione e robustezza del modello.

La spiegazione di ciò sta nel fatto che tale algoritmo riesce a comporre in maniera ottimale due algoritmi in modo tale da ottenere risultati che sono di gran lunga migliori della migliore delle due tecniche.

Quindi successivamente ci siamo focalizzati sull'approccio BPGA provando a semplificare ulteriormente il sistema aggregando le 9 aree (data set) precedentemente individuate in 3 macro aree (nord-centro-sud) e quindi cercando di ridurre il numero di modelli locali da 9 a 3.

Nelle seguenti due tabelle (4.8 e 4.9) vi è la comparazione dei risultati in valore medio e massimo fra l'approccio BPGA a 9 modelli (BPGA9) e quello a 3 (BPGA3). Inoltre, per completezza, vengono riportati anche i risultati degli altri modelli neurali a 3 zone (BP3 e GA3).

I test sui modelli neurali si riferiscono alla media su 10 run, pertanto tra parentesi vi sono anche i valori delle deviazioni standard.

## Risultati

|                | BPGA9                               | BPGA3                               | GA3                                 | BP3         | NN          |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Nord-Estate    | 0.64 ( $\pm 0.01$ )                 | 0.61 ( $\pm 0.01$ )                 | 0.86 ( $\pm 0.04$ )                 | 0.74        | 1.66        |
| Nord-Inverno   | <b>0.67</b> ( $\pm 0.01$ )          | <b>0.8</b> ( $\pm 0.01$ )           | 1.19 ( $\pm 0.07$ )                 | 0.88        | 1.16        |
| Centro-Estate  | 0.69 ( $\pm 0.03$ )                 | 0.73 ( $\pm 0.02$ )                 | 1.06 ( $\pm 0.15$ )                 | 0.79        | 0.79        |
| Centro-Inverno | <b>0.58</b> ( $\pm 0.03$ )          | <b>0.83</b> ( $\pm 0.02$ )          | 1.12 ( $\pm 0.04$ )                 | 1.83        | 0.93        |
| Sud-Estate     | 0.50 ( $\pm 0.02$ )                 | 0.52 ( $\pm 0.01$ )                 | 0.79 ( $\pm 0.06$ )                 | 0.81        | 1.73        |
| Sud-Inverno    | 0.66 ( $\pm 0.02$ )                 | 0.6 ( $\pm 0.01$ )                  | 0.97 ( $\pm 0.06$ )                 | 1           | 1.9         |
| <b>GLOBALE</b> | <b>0.62 (<math>\pm 0.02</math>)</b> | <b>0.68 (<math>\pm 0.01</math>)</b> | <b>1.00 (<math>\pm 0.07</math>)</b> | <b>1.01</b> | <b>1.30</b> |

Tabella 4.8: comparazione risultati (errore medio °C)

## Risultati

|                | BPGA9       | BPGA3       | GA3         | BP3         | NN          |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Nord-Estate    | 2.05        | 1.8         | 3.07        | 1.86        | 8.70        |
| Nord-Inverno   | <b>2.73</b> | <b>3.72</b> | 5.84        | 3.35        | 7.20        |
| Centro-Estate  | 2.50        | 2.25        | 3.94        | 2.71        | 4.20        |
| Centro-Inverno | 2.77        | 2.7         | 4.16        | 5.11        | 3.80        |
| Sud-Estate     | 1.63        | 1.8         | 2.74        | 2.78        | 8.40        |
| Sud-Inverno    | 2.32        | 2.17        | 3.33        | 3.05        | 9.10        |
| <b>GLOBALE</b> | <b>2.77</b> | <b>3.72</b> | <b>5.84</b> | <b>5.11</b> | <b>9.10</b> |

Tabella 4.9: comparazione risultati (errore max °C)

Da tali risultati è possibile notare che passando da 9 a 3 modelli locali la perdita di precisione è trascurabile (+0.06 C sull'errore medio) conservando una deviazione standard molto bassa.

Nella figura 4.11 viene riportato a titolo di esempio una comparazione grafica della previsione fatta tra il modello GA e BPGA con i valori reali su otto città di testing del nord Italia nel periodo invernale.

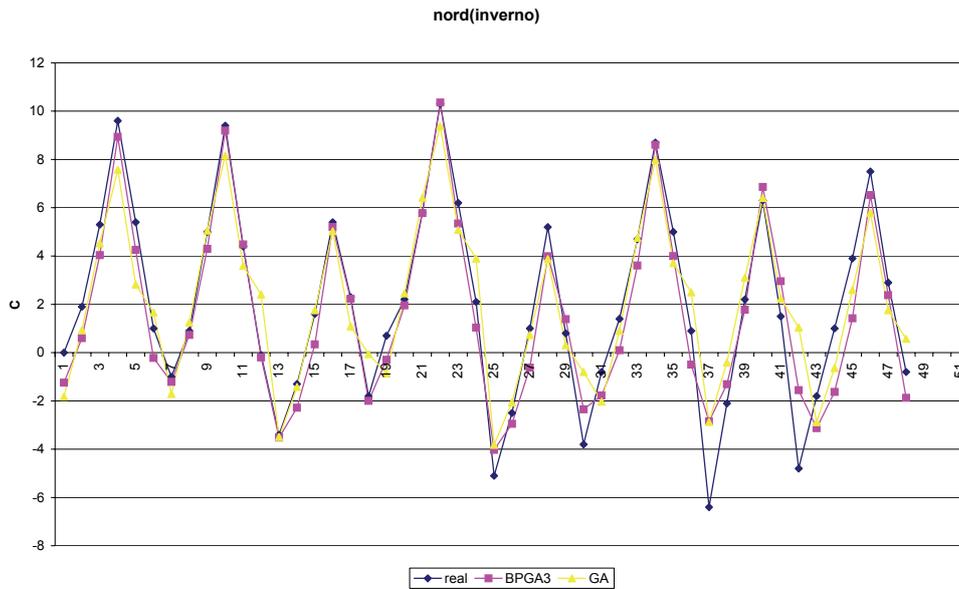


Figura 4.11: comparazione segnali

Infine, nella seguente tabella viene proposta un'analisi sulla precisione del modello BPGA3 sviluppato.

In particolare, viene riportato l'errore medio commesso, l'errore massimo, la percentuale di punti su cui si commette un errore inferiore a 2°C ed il 95esimo percentile di errore, ovvero l'errore di stima entro cui rientrano il 95% dei test.

## Analisi Risultati (Reti Neurali BPGA3)

|                | Avg Err ( $\pm\sigma$ )                | Max Err        | Err < 2.0 ° C | 95%            |
|----------------|--|----------------|---------------|----------------|
| Nord-Estate    | 0.61 °C ( $\pm 0.01$ )                 | 1.8 °C         | 100%          | 1.4 °C         |
| Nord-Inverno   | 0.8 °C ( $\pm 0.01$ )                  | 3.72 °C        | 95%           | 2 °C           |
| Centro-Estate  | 0.73 °C ( $\pm 0.02$ )                 | 2.25 °C        | 98%           | 1.7 °C         |
| Centro-Inverno | 0.83 °C ( $\pm 0.02$ )                 | 2.7 °C         | 95%           | 2 °C           |
| Sud-Estate     | 0.52 °C ( $\pm 0.01$ )                 | 1.7 °C         | 100%          | 1.25 °C        |
| Sud-Inverno    | 0.6 °C ( $\pm 0.01$ )                  | 2.17 °C        | 99%           | 1.35 °C        |
| <b>GLOBALE</b> | <b>0.68 °C (<math>\pm 0.01</math>)</b> | <b>3.72 °C</b> | <b>98%</b>    | <b>1.62 °C</b> |

Tabella 4.10: analisi risultati modello BPGA3

Da tale analisi risulta quindi che il modello a reti neurali BPGA3 nel 98% dei casi commette un errore inferiore ai 2 °C e che il 95mo percentile (ovvero l'errore di temperatura entro cui rientrano il 95% dei casi) è di 1.62 °C.

Tali risultati sono importanti perché ci permettono di avere un modello di stima della temperatura dotato di elevata precisione ma al tempo stesso semplice (3 modelli locali ciascuno di essi diviso in

estate-inverno, per un totale di 6 modelli neurali per tutta l'Italia) e veloce nel calcolo. Tale caratteristica rende tale modello uno strumento ottimale per gli scopi della progettazione di edifici eco-sostenibili e quindi il modello BPGA3 è stato integrato nella piattaforma ODESSE.

La temperatura ambientale : stima valori giornalieri e calcolo carico termico

Come detto nelle precedenti sezioni, uno degli input dei modelli neurali è il giorno dell'anno (1-365). Le reti sono state addestrate sui valori medi mensili considerando il giorno centrale del mese come riferimento e quindi tali modelli possono essere usati per stimare la temperatura di un qualsiasi giorno dell'anno. Questa caratteristica è molto importante nella progettazione efficiente di edifici quando si devono stimare con accuratezza parametri come il carico termico ove una stima giornaliera della temperatura ambientale è critica. In tale contesto sono stati quindi stimati i dati giornalieri con gli ultimi modelli neurali BPGA3 su un anno intero per la città di Roma, in quanto per un confronto si hanno a disposizione i dati reali giornalieri ed orari di temperatura, e tali valori sono stati usati per la stima del carico termico invernale. In tale calcolo la componente della radiazione solare è stata posta a zero così da osservare esclusivamente l'effetto della temperatura. Tali test sono stati eseguiti simulando edifici con 4 diversi rapporti superficie-volume (0.6, 0.5, 0.4, 0.28) e 3 diverse percentuali di finestrate (15%, 30%, 60%), per un totale di 12 tipologie di edifici (tab. 4.11).

|            | S/V  | Finestratura |
|------------|------|--------------|
| Building1  | 0.6  | 15%          |
| Building2  | 0.6  | 30%          |
| Building3  | 0.6  | 60%          |
| Building4  | 0.5  | 15%          |
| Building5  | 0.5  | 30%          |
| Building6  | 0.5  | 60%          |
| Building7  | 0.4  | 15%          |
| Building8  | 0.4  | 30%          |
| Building9  | 0.4  | 60%          |
| Building10 | 0.28 | 15%          |
| Building11 | 0.28 | 30%          |
| Building12 | 0.28 | 60%          |

Tabella 4.11: tipologie di edifici

Su tali edifici abbiamo confrontato (fig. 4.12) i risultati ottenuti usando come input per il carico termico i dati reali, le stime giornaliere del modello neurale e le stime del software Trnsys che per tutti i giorni del mese assegna lo stesso valore di temperatura. Il modello di carico termico utilizzato è quello di Trnsys.

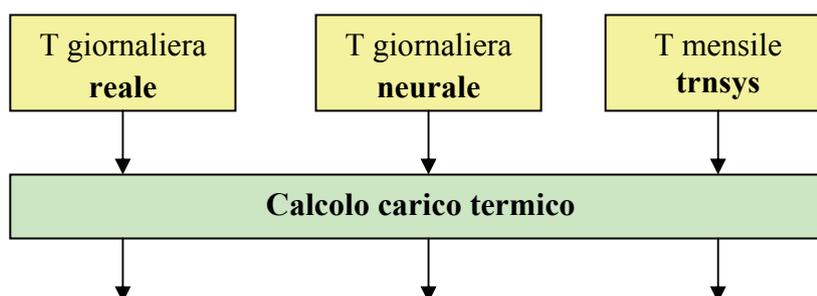


Figura 4.12 : confronto del carico termico

Nella seguente tabella vengono confrontati gli errori (assoluti e relativi) nella stima del carico termico tra il modello neurale, che fornisce una stima giornaliera della temperatura, e trnsys, che invece fornisce solo una stima media mensile.

|              | Reale<br>(Kwh) | Neurale<br>(Kwh) | Mensile<br>(Kwh) | Err ass<br>neurale<br>(Kwh) | Err ass<br>mensile<br>(Kwh) | Err rel<br>neurale | Err rel<br>mensile |
|--------------|----------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| Building1    | 21719          | 20975            | 20810            | 744                         | 909                         | 0.034              | 0.042              |
| Building2    | 28012          | 27086            | 26841            | 926                         | 1171                        | 0.033              | 0.042              |
| Building3    | 38502          | 37250            | 36900            | 1251                        | 1601                        | 0.032              | 0.042              |
| Building4    | 37315          | 36020            | 35745            | 1295                        | 1569                        | 0.035              | 0.042              |
| Building5    | 46837          | 45274            | 44878            | 1563                        | 1959                        | 0.033              | 0.042              |
| Building6    | 64251          | 62135            | 61572            | 2116                        | 2679                        | 0.033              | 0.042              |
| Building7    | 69954          | 67510            | 66923            | 2444                        | 3030                        | 0.035              | 0.043              |
| Building8    | 88530          | 85526            | 84739            | 3004                        | 3791                        | 0.034              | 0.043              |
| Building9    | 120874         | 116831           | 115750           | 4042                        | 5124                        | 0.033              | 0.042              |
| Building10   | 297469         | 286778           | 284217           | 10691                       | 13252                       | 0.036              | 0.045              |
| Building11   | 330878         | 319385           | 316655           | 11493                       | 14223                       | 0.034              | 0.043              |
| Building12   | 396381         | 382988           | 379534           | 13392                       | 16847                       | 0.033              | 0.043              |
| <b>MEDIA</b> | 128394         | 123980           | 122880           | 4413                        | 5513                        | 0.034              | 0.0425             |

Tabella 4.12: risultati stima carico termico

Da tali risultati si può notare che l'errore di stima viene migliorato in termini assoluti mediamente di oltre 1000Kwh ed in termini relativi l'errore passa dal 4.25% al 3.4%, ovvero vi è un abbattimento dell'errore del 20%.

Questo risultato è rilevante perché consente al progettista di scegliere i materiali più idonei e di dimensionare meglio gli impianti per il fabbisogno energetico.

#### 4.8 Osservazioni finali

In questo capitolo è stato descritto il lavoro svolto per lo sviluppo del *Neural Weather Generator* (NWG). L'NWG è un modulo di calcolo per la stima di parametri ambientali (radiazione solare e temperatura ambientale) basato su reti neurali.

Il problema della radiazione solare si è rivelato abbastanza semplice in quanto il modello viene ben identificato con le informazioni a disposizione (coordinate geografiche e giorno dell'anno) ed un modello globale nazionale ha fornito risultati soddisfacenti commettendo un errore inferiore al 4% ed abbattendo di oltre il 50% l'errore commesso (9%) da metodi tradizionali.

La stima della temperatura ambientale si è rivelata più complessa, in quanto influenzata da condizioni ambientali locali di cui non si hanno a disposizione sufficienti informazioni (es. vento, prossimità di mare/laghi, pressione, umidità, etc.), ed ha richiesto un notevole lavoro di ricerca. Infatti, un modello globale della temperatura non fornisce risultati soddisfacenti (errore medio di 1.25 °C ed errore massimo di 6.35° C), per cui sono i dati sono stati partizionati secondo aree climatiche e sono stati comparati diversi approcci alla modellazione basati su tecniche tradizionali e di soft-computing (reti neurali, algoritmi genetici, fuzzy logic). Il modello che ha prodotto i risultati migliori è una composizione di reti neurali addestrate con un algoritmo ibrido Back-Propagation-Genetico (BPGA) su tre zone climatiche (nord-centro-sud) e due stagioni (estate-inverno) per un totale di sei modelli. L'analisi di tali modelli ha evidenziato un errore medio di 0.67 °C, un errore massimo di 3.72 °C ed il 98% dei casi con un errore inferiore ai 2 °C. Infine, la deviazione standard sull'errore è risultata molto bassa (0.02 °C) dimostrando l'affidabilità e al robustezza dell'approccio.

Successivamente i modelli neurali BPGA sono stati testati nella stima del carico termico per la città di Roma. I risultati hanno evidenziato che con i metodi sviluppati è possibile abbattere l'errore di stima del 20% rispetto a metodi tradizionali.

I risultati ottenuti sono importanti perché ci permettono di avere dei modelli di stima di radiazione e temperatura dotati di elevata precisione ma al tempo stesso semplici e veloci nel calcolo. Tale caratteristica rende i modelli sviluppati uno strumento ottimale per gli scopi della progettazione di edifici eco-sostenibili e quindi il NWG è stato integrato nella piattaforma ODESSE con tutti i suoi modelli.

Il lavoro svolto è altamente innovativo perché metodologie di *soft-computing* non erano mai state applicate al problema della modellazione della temperatura ambientale e perché tale problema in precedenza è stato risolto ottenendo precisioni soddisfacenti solo con tecniche analitiche computazionalmente molto pesanti. In tale caso invece, una volta addestrato il modello la sua applicazione ha un costo computazionale assolutamente ridotto.

Infine, il lavoro futuro riguarderà l'estensione del NWG ad altri importanti parametri ambientali come la stima dell'umidità ambientale.

## 5. Modello matematico dell'edificio

Il carico termico di un edificio è definito come l'energia che un impianto termico deve fornire o sottrarre all'edificio per compensare la variazione delle componenti che determinano il bilancio termico dell'edificio e, quindi, mantenere le condizioni termoigrometriche prefissate. Un approccio rigoroso del bilancio termico globale porterebbe ad un sistema di equazioni differenziali molto complesso che non si addice alle esigenze delle applicazioni impiantistiche. Si ricorre quindi a delle semplificazioni calcolistiche che, però, non pregiudicano la coerenza e la validità del bilancio termico semplificato.

Poiché, come specificato nell'introduzione, l'obiettivo di ODESSE è la simulazione di un distretto energetico in regime di generazione distribuita, il modello matematico dell'edificio è stato sviluppato seguendo una metodologia semplificata, in cui il bilancio energetico dello stesso è determinato ipotizzando la variabilità della temperatura esterna e della radiazione solare. I vincoli che hanno condizionato le scelte sono legati alla minimizzazione dell'errore rispetto ad altri software che utilizzano metodi più precisi e al contenimento dell'onere di calcolo computazionale.

Gli input al modello sono i parametri termofisici che descrivono, con un grado elevato di dettaglio, la struttura (geometrica e tipologica) dell'edificio e il suo profilo di utilizzo e le caratteristiche prestazionali degli impianti.

Il modello matematico implementato consente di calcolare il carico termico e le temperature interne dell'edificio con passo di integrazione di un'ora<sup>3</sup>. Di seguito verranno descritti gli algoritmi implementati per la determinazione della temperatura interna dell'edificio, dell'andamento del carico termico in regime invernale ed estivo.

### 5.1 Carico termico invernale

Per il calcolo del carico termico in regime invernale si è assunta l'ipotesi di edificio termostattizzato, ovvero di non variabilità delle condizioni interne dell'edificio fra due passi successivi di integrazione; conseguentemente il termine di accumulo nell'equazione di bilancio dell'edificio è assunto nullo. Quindi l'evoluzione nel tempo del carico termico è vista come successione temporale di stati stazionari.

L'equazione implementata è:

$$Q_g + Q_i - Q_{disp} - Q_v + Q_{aux} = 0 \quad (1)$$

dove  $Q_g$  è il guadagno solare attraverso le superfici trasparenti ( $Q_{sol}$ ) e opache ( $Q_{par}$ ),  $Q_i$  il guadagno interno dovuto alla presenza di persone o dispositivi di varia natura,  $Q_{disp}$  la dispersione attraverso le superfici trasparenti e opache,  $Q_v$  lo scambio termico per ventilazione e  $Q_{aux}$  la potenza termica fornita dagli impianti di generazione termica.

Il calcolo dei singoli termini viene effettuato, secondo un sistema a soglia, quando la temperatura interna dell'edificio, calcolata mediante un'equazione differenziale del primo ordine (descritta in

---

<sup>3</sup> Il passo di integrazione non è univocamente definito e può essere variato secondo particolari esigenze fino ad un minimo di 1 quarto d'ora.

dettaglio di seguito), raggiunge il valore di riferimento (fissato secondo norma a 20° C per il regime invernale). La combinazione di queste due equazioni fa sì che l'andamento del carico termico invernale non risenta eccessivamente di effetti di attenuazione e sfasamento del flusso termico, come evidenziano i grafici riportanti i confronti con le simulazioni eseguite con Trnsys.

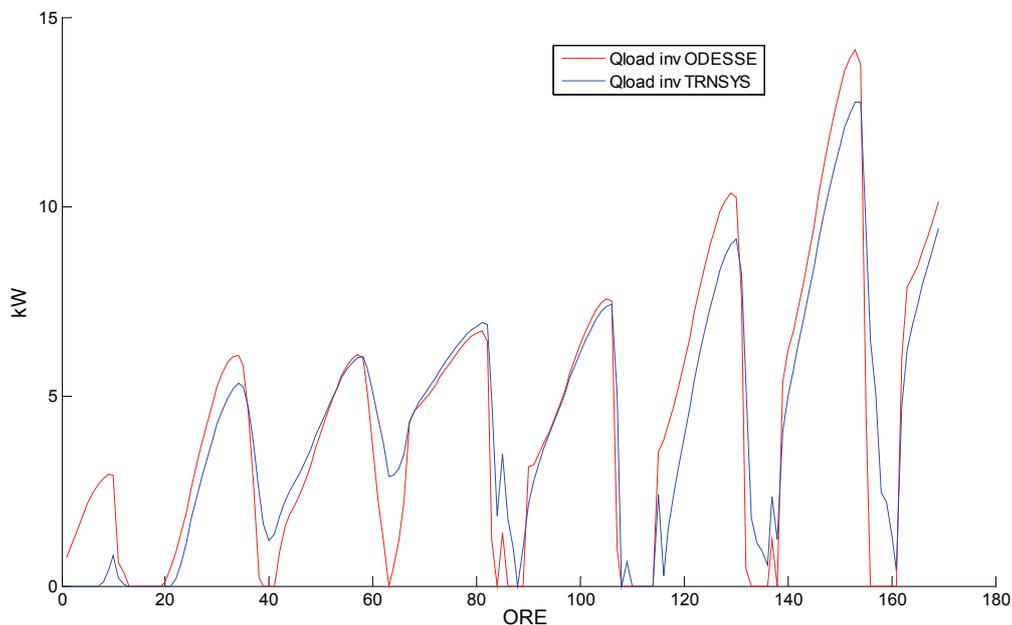


Figura 5.1: Carico termico totale invernale orario

Il periodo di riscaldamento è individuato dall'utente attraverso la scelta della zona geografica dove costruire l'edificio in progetto. Il preprocessore associa alla zona geografica scelta, la relativa zona climatica (dalla A alla F) e quindi il relativo periodo di riscaldamento come indicato dal DPR 412/95.

Grazie ad un sistema a doppio switch è possibile individuare durante la simulazione annua il primo periodo di riscaldamento (Gennaio – Aprile) e il secondo periodo (Ottobre – Dicembre)

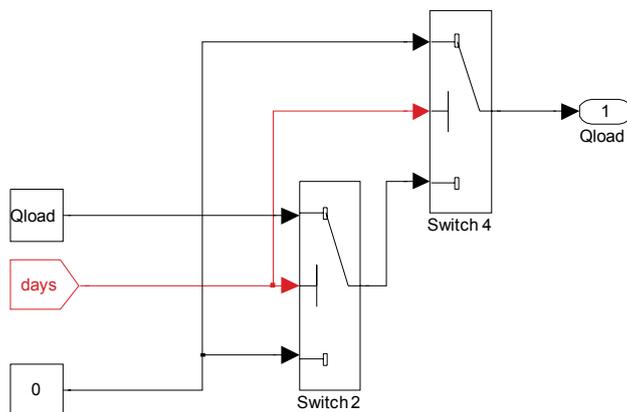


Fig 6.2 - Sistema in simulink per il calcolo del periodo di riscaldamento

Il periodo di raffrescamento è calcolato come complementare al relativo periodo di riscaldamento.

Il fabbisogno termico invernale è calcolato integrando il carico orario per l'intero periodo di riscaldamento e raffrescamento per tutti gli intervalli di tempo per i quali la temperatura scende sotto i 20 °C d'inverno ( temperatura di progetto invernale come definita dal DPR 412/95)

Lo schema in Simulink utilizzato per effettuare il calcolo del fabbisogno termico invernale è il seguente:

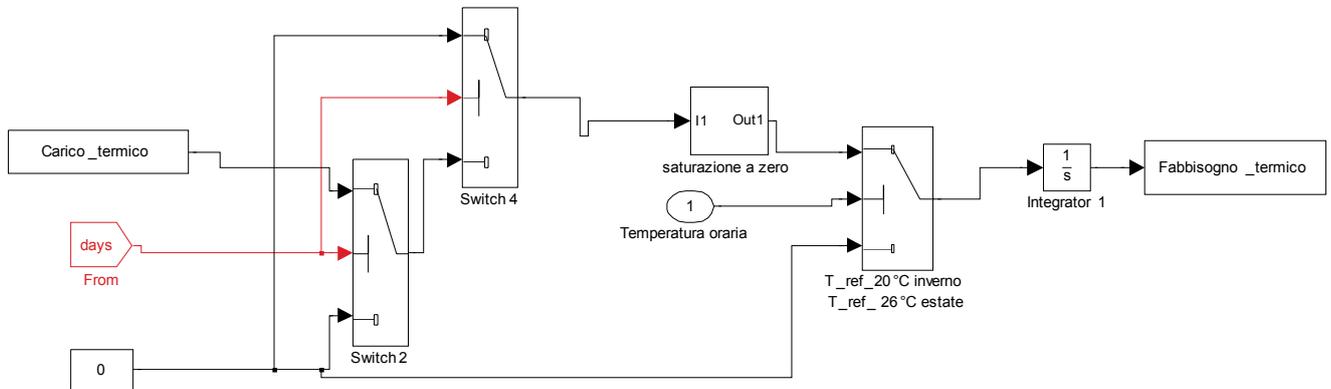


Fig 5.3 - Schema a blocchi in Simulink per il calcolo del fabbisogno termico

Nel calcolo della temperatura oraria (vedi paragrafo specifico) è impiegato un blocco integrale con sistema di saturazione della temperatura alla temperatura di progetto (20°C per il periodo di riscaldamento e 26°C per il raffrescamento), quando la temperatura della zona termica rispettivamente scende sotto o sale sopra le relative temperature di progetto. Infatti si ipotizza che l'impianto termico riesca a coprire istantaneamente l'intera richiesta termica ( nella simulazione dinamica edificio – impianto verrà simulato l'effettivo comportamento degli impianti termici e quindi la reale risposta della temperatura interna al funzionamento degli stessi).

Nei paragrafi che seguono si riporta una dettagliata analisi dei singoli fattori che compongono l'equazione (1).

## 5.2 Apporto termico solare: Qsol

Particolare attenzione è stata posta nella determinazione dell'apporto termico solare attraverso le superfici trasparenti, in quanto elemento più critico e quantitativamente rilevante fra le componenti che concorrono alla definizione del carico termico dell'edificio, specialmente nel calcolo estivo.

In particolare l'apporto termico attraverso le superfici trasparenti è dovuto a tre componenti: un flusso conduttivo e convettivo provocato dalla differenza di temperatura fra ambiente esterno e interno, lo scambio termico radiativo ad alte lunghezze d'onda (sopra i 2500nm) fra il "componente finestra" e l'ambiente ad esso circostante e fra gli strati dello stesso componente e ad un flusso termico radiativo a bassa lunghezza d'onda (minore di 2500 nm) dovuto alla radiazione solare che incide direttamente sulla finestra.

La prima componente è calcolata con una relazione del tutto simile a quella delle pareti opache ed inglobata in un unico termine relativo alle dispersioni per convezione dell'involucro edilizio:

$$Q_{disp\_f} = \sum_i U_{fi} A_{fi} (T_e - T_i)$$

essendo  $i$  la  $i$ -esima giacitura,  $U_f$  la trasmittanza totale dell'infitto [ $W/m^2 K$ ],  $A_f$  la superficie dello stesso [ $m^2$ ] e  $T_e$  la temperatura esterna [ $K$ ] e  $T_i$  quella della zona interna [ $K$ ].

In una prima fase dello sviluppo della piattaforma, per le ragioni di semplificazione del modello espone in precedenza, la componente radiativa è stata determinata con la relazione proposta nella norma UNI EN ISO13790:2005 :

$$Q_{sol} = \sum_i I_i A_i sg$$

con  $I_i$  radiazione totale sulla  $i$ -esima giacitura [ $W/m^2$ ],  $A_f$  la superficie dell'infitto [ $m^2$ ] e  $sg$  fattore correttivo della radiazione solare che tiene conto dei fenomeni di scambio termico che determinano la quota parte di radiazione incidente trasmessa dal vetro.

La determinazione del valore da assegnare ad  $sg$  è stata effettuata confrontando, per ciascun edificio benchmark, il valore del fabbisogno termico (invernale ed estivo) determinato con Trnsys e quelli ottenuti con le simulazioni con ODESSE in cui  $sg$  variava in un opportuno intervallo (0,3÷0,75) e scegliendo il valore che minimizza l'errore (in Fig. 4.1 è riportato il test riferito all'edificio C30).

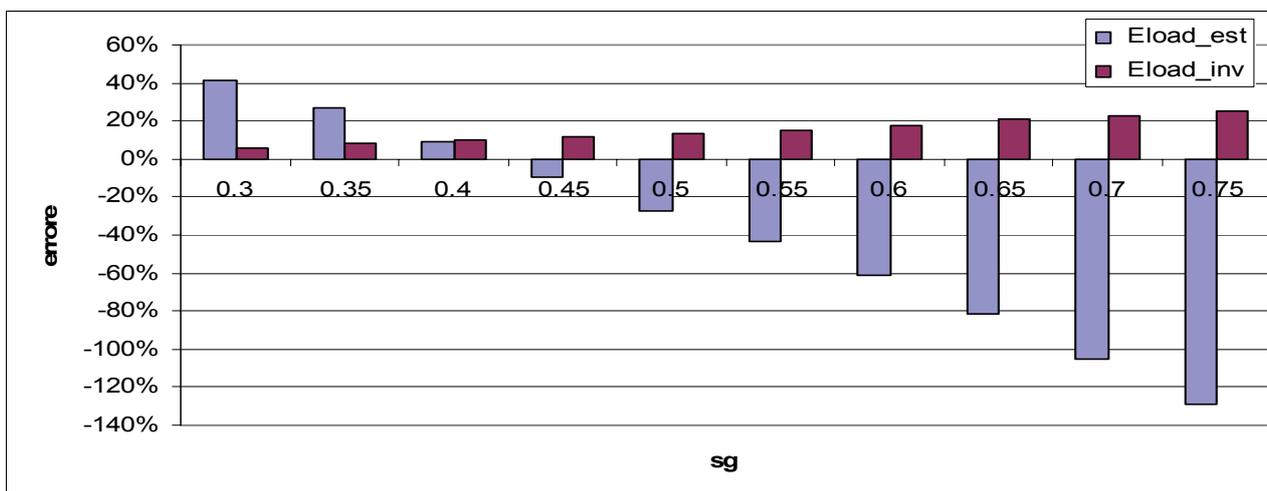


Fig. 5.4 – differenza percentuale fra il carico termico invernale (Eload\_inv) e quello estivo (Eload\_est)

I risultati hanno mostrato un errore nel calcolo del fabbisogno termico sempre inferiore al 15%, ma hanno evidenziato la dipendenza di  $sg$  dalle caratteristiche geometriche di infissi ed edificio. Si è, quindi, proceduto ad eseguire una serie di test di primo approccio per verificare l'esistenza di una correlazione fra i valori di  $sg$  e i rapporti superficie-volume e superficie trasparente-superficie opaca degli edifici benchmark, riassunti nelle figure 4.2 e 4.3.

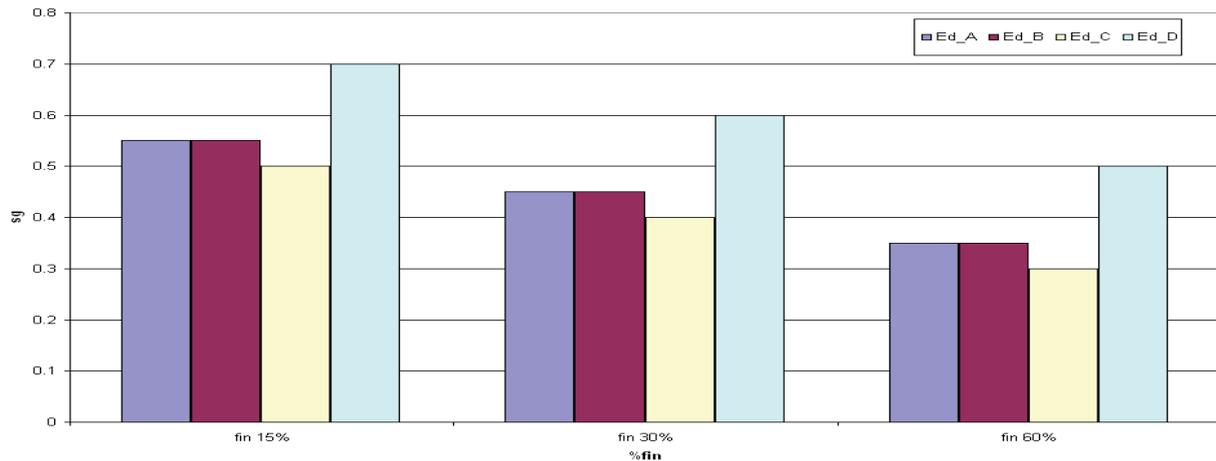


Fig. 5.5 – variazione di sg in funzione del rapporto superficie trasparente-superficie opaca (%fin)

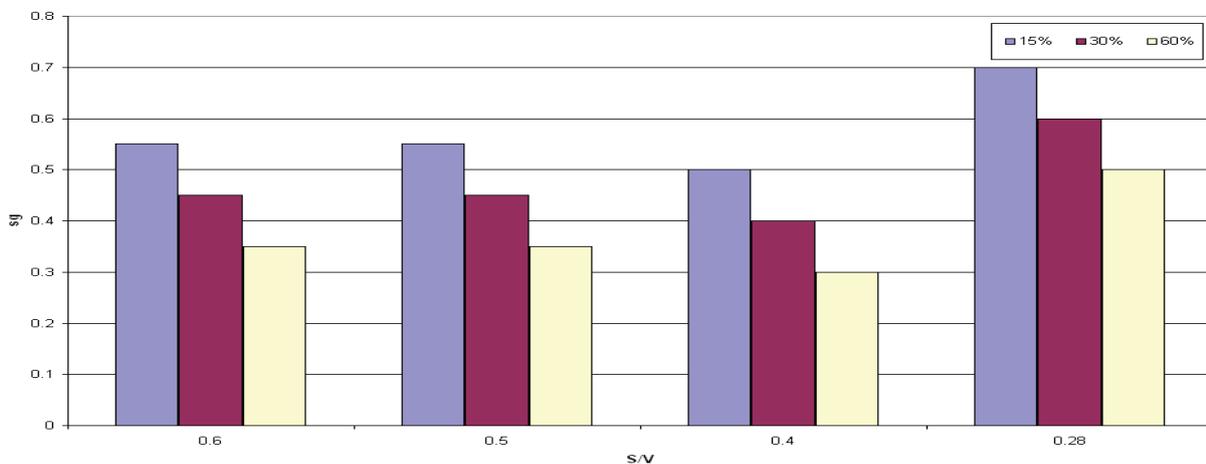


Fig. 5.6 – variazione di sg in funzione del rapporto superficie-volume (S/V)

Dai grafici riportati si deduce l'esistenza di una relazione di proporzionalità (inversa) fra sg e il rapporto superficie trasparente-superficie opaca e come non sia possibile trovare una corrispondenza fra sg e il rapporto superficie-volume e, quindi, generalizzare la determinazione del valore ottimale di sg. Queste considerazioni indicano come, nel caso di simulazioni dinamiche, non sia possibile ricorrere ad un'espressione (empirica) per il calcolo della componente radiativa dell'apporto termico solare come quella ora discussa.

Si è, quindi, proceduto ad implementare una relazione analitica che calcoli i parametri caratteristici del comportamento termico radiativo di un infisso e che tenga conto della variabilità degli stessi in funzione delle caratteristiche della radiazione solare (in particolare dell'angolo di inclinazione), fornite dal Neural Weather Generator.

In prima battuta è stato calcolato il coefficienti di trasmissione ( $\tau_{tot}$ ) per un infisso costituito da N vetri mediante le relazioni di Snell e di Fresnell

$$\tau_{tot} = \frac{1}{2}(T_{1,N} + T_{2,N})$$

in cui:  $T_{i,N} = \frac{T_{i,1} T_{i,N-1}}{1 - R_{i,1} R_{i,N-1}}$  trasmittanza ottica di un vetro con N strati

$R_{i,N} = R_{i,N-1} + \frac{R_{i,1} T_{i,N}}{1 - R_{i,1} R_{i,N-1}}$  riflettanza ottica di un vetro con N strati

$T_i = \frac{\tau_a (1 - \rho_i)^2}{1 - \tau_a^2 \rho_i^2}$  trasmittanza ottica di un vetro singolo

$\tau_a = \exp\left(\frac{-kL}{\cos \vartheta_2}\right)$  trasmittanza interna

$\rho$  riflettanza ottica di un vetro singolo

$kL$  lunghezza di estinzione

$\vartheta$  angolo di inclinazione della radiazione solare

Questo approccio, pur fornendo in modo esatto le proprietà termiche dei vetri si è rivelato molto limitante in quanto necessita della conoscenza della lunghezza di estinzione del vetro, caratteristica legata alla composizione chimica dello stesso e difficilmente reperibile nei database che riportano i parametri caratteristici dei vetri stessi. È stata, quindi, adottata la metodologia proposta dall'ASHRAE nel Fundamental Handbook 2001, la quale definisce il flusso solare termico trasmesso attraverso le superfici trasparenti in funzione del coefficiente di guadagno termico solare SHGC (Solar Heat Gain Coefficient).

Tale flusso ( $Q_{sol}$ ) può essere diviso in quello prodotto dalla radiazione diretta ( $Q_b$ ) e in quello prodotto dalla radiazione diffusa ( $Q_d$ ), comprensiva della parte di radiazione diffusa dovuta al cielo e di quella riflessa dal terreno:

$$Q_{sol} = Q_b + Q_d = \sum_i I_{b_i} SHGC_b A_i + \sum_i I_{d_i} SHGC_d A_i$$

in cui la sommatoria è estesa a tutte le superfici vetrate presenti nell'involucro edilizio,  $A_i$  è la superficie trasparente dell'infisso i-esimo e  $I_{b_i}$  e  $I_{d_i}$  rispettivamente la radiazione oraria diretta e diffusa che incide sull'infisso i-esimo. L'SHGC rappresenta la frazione di radiazione solare incidente sulla superficie vetrata che contribuisce al carico termico dell'edificio e include sia la porzione direttamente trasmessa, sia quella assorbita dal vetro e dal telaio e successivamente re-emessa. In particolare, l'SHGC<sub>b</sub> dipende dall'angolo di incidenza della componente diretta della radiazione solare incidente ( $\vartheta$ ) ed è dato da:

$$SHGC_b = SHGC(\vartheta) = T_{1,L}(\vartheta) + \sum_k^L N_k A_{k:(1,L)}(\vartheta)$$

$T_{1,L}(\vartheta)$  = coefficiente di trasmissione

$L$  = numero di strati che costituiscono il vetro

$A_{k:(1,L)}(\vartheta)$  = coefficiente. assorbimento

$N_k$  = frazione di flusso entrante nello strato  $k$ , dato dal rapporto  $U/h$  in cui  $U$  è la trasmittanza termica e  $h$  il coefficiente di convezione fra l'esterno e lo strato  $k$ -esimo del vetro.

L'SHGC<sub>d</sub> è indipendente dall'angolo di incidenza  $\vartheta$  e si calcola con l'espressione precedente riferita ad un particolare angolo di incidenza della radiazione, corrispondente alle condizioni medie emisferiche del vetro:

$$SHGC_d = \langle SHGC \rangle_e = \langle T_{1,L} \rangle_e + \sum_i^L N_k \langle A_{k(1,L)} \rangle_e$$

I grafici seguenti riportano il confronto fra il flusso termico solare prodotto dalla radiazione diretta al variare dell'angolo di incidenza nell'intervallo  $0 \div 90^\circ$  (intervallo oltre il quale la radiazione diretta non incide più sulla finestra) determinato con Trnsys ( $Q_{soltr}$ ) e con ODESSE ( $Q_{fin}$ ) per tre tipologie di vetri.

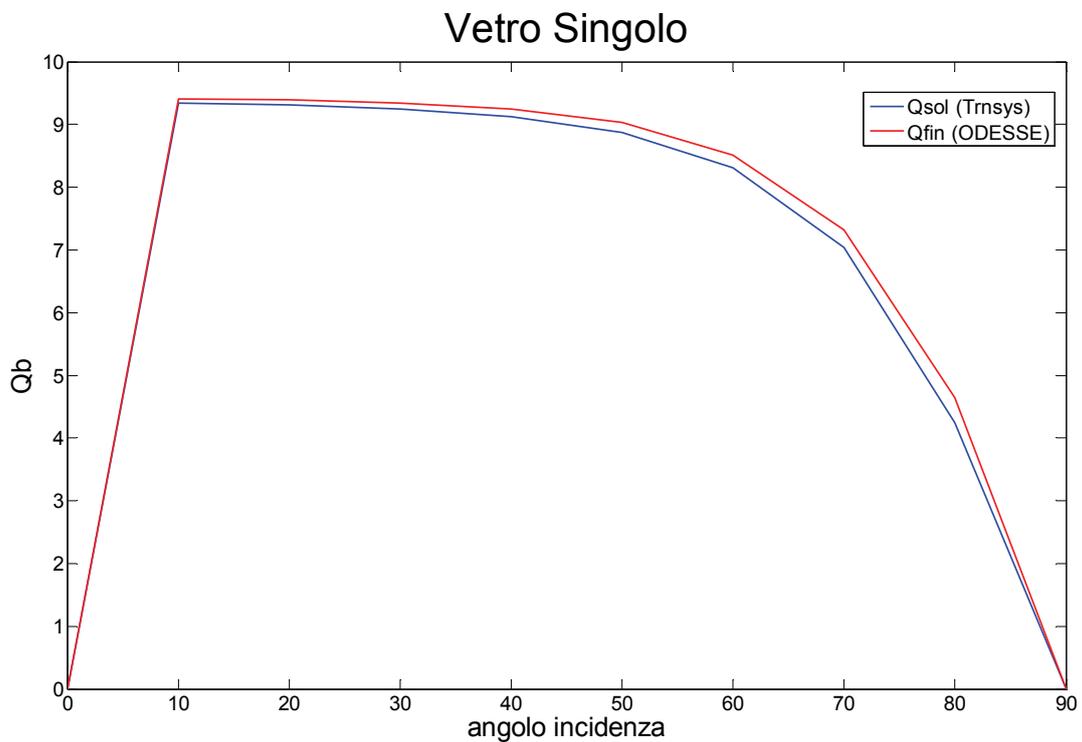


Fig. 5.7 - Flusso termico solare dovuto alla radiazione diretta per vetro singolo

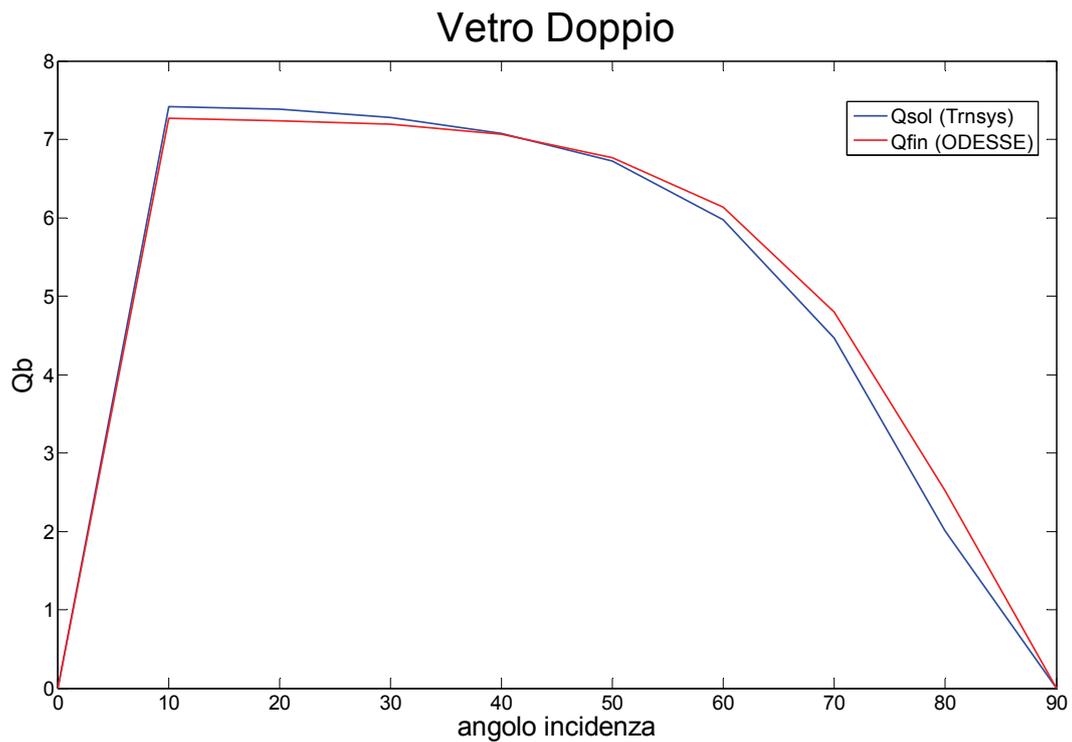


Fig. 5.8 - Flusso termico solare dovuto alla radiazione diretta per vetro doppio

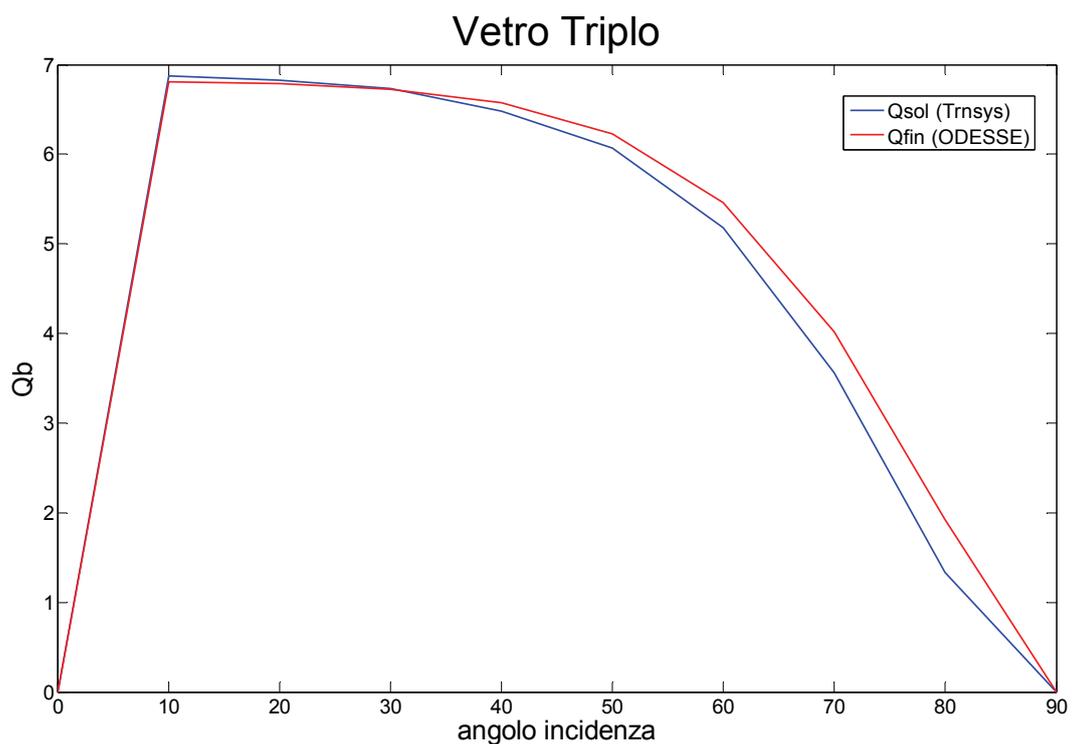


Fig. 5.9 - Flusso termico solare dovuto alla radiazione diretta per vetro triplo

Oltre alla metodologia su esposta, l'ASHRAE fornisce un database con le proprietà fisiche di un numero rappresentativo di vetri, che sono state inserite nel database di ODESSE. Nel caso si volessero utilizzare vetri non presenti nel database o in assenza dei parametri necessari a determinare l'SHGC, questo può essere calcolato mediante una interpolazione e una correzione funzione del coefficiente di trasmittanza del vetro.

Si riporta di seguito, a titolo esemplificativo, una tabella per un classico vetro doppio.

|      | Angolo di ingardicidenza [gradi] |      |      |      |      |      | Totale        |                  |
|------|----------------------------------|------|------|------|------|------|---------------|------------------|
|      | 0                                | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | Hemispherical | Telaio alluminio |
| SHGC | 0,76                             | 0,74 | 0,71 | 0,64 | 0,50 | 0,26 | 0,66          | 0,75             |
| T    | 0,70                             | 0,68 | 0,65 | 0,58 | 0,44 | 0,21 | 0,60          |                  |
| A1   | 0,10                             | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,11          |                  |
| A2   | 0,07                             | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,07          |                  |

Tabella 5.1: caratteristiche vetro doppio

A1 e A2 rappresentano il coefficiente di assorbimento rispettivamente dello strato interno e dello strato esterno del vetro.

Anche la parte opaca di una finestra contribuisce a generare un apporto termico, in quanto una parte dell'energia solare assorbita viene trasmessa all'interno dell'edificio. Tale flusso ( $Q_{op}$ ) è espresso dalla relazione:

$$Q_{op} = I_t SHGC_{op} A_p$$

dove  $I_t$  è la radiazione totale incidente,  $A_p$  l'area complessiva della superficie opaca della finestra (somma del telaio e degli eventuali divisori) e l' $SHGC_{op}$  è dato da:

$$SHGC_{op} = \frac{SHGC_f A_f + \sum_i SHGC_i A_i}{A_f + \sum_i A_i}$$

essendo  $f$  il telaio e  $i$  l' $i$ -esimo divisore.

### 5.3 Apporto termico solare attraverso le pareti verticali: $Q_{par}$

Il calcolo dello scambio termico in pareti soggette alla radiazione solare è facilmente eseguibile attraverso il concetto della temperatura aria-sole ( $T_{as}$ ), definita come quella temperatura fittizia dell'aria esterna capace di scambiare per sola convezione termica il calore effettivamente scambiato dalla parete sia per convezione che per irraggiamento. Grazie alla temperatura aria-sole, è possibile evidenziare il diverso comportamento tra giaciture soleggiate e giacitura in ombra.

La relazione che esprime la  $T_{as}$  è:

$$T_{as} = T_e + \frac{\alpha I}{h_e}$$

dove

$T_e$  è la temperatura oraria dell'aria esterna

$\alpha$  è il fattore di assorbimento della finitura esterna della parete

$I$  è l'irraggiamento orario totale sulla parete considerata

Nella determinazione del carico termico totale, l'implementazione in Simulink è stata effettuata

considerando separatamente i due termini  $T_e$  e  $\frac{\alpha I}{h_e}$  che compaiono rispettivamente nei termini  $Q_{disp}$

e  $Q_{par}$ .

## 5.4 Apporti termici interni: Qint [kW]

Gli apporti interni sono calcolati separatamente per mezzo di due fattori: uno relativo alla presenza di occupanti (Qoc) e l'altro all'illuminazione artificiale (Qill).

### 5.4.1 Apporti termici degli occupanti

Gli apporti interni medi di calore derivanti dalla presenza di occupanti sono ricavati in funzione:

- della destinazione d'uso dell'edificio: residenziale o terziario;
- del profilo di utilizzo dell'edificio: ore di permanenza delle persone;
- dell'indice di affollamento: numero medio di persone contemporaneamente presenti.

I valori degli apporti termici che ogni persona immette nell'ambiente sono differenziati in funzione della destinazione dell'edificio: per edifici ad uso terziario ad ogni persona è associato un apporto termico sensibile pari a 65 W e un apporto termico latente pari a 55 W, mentre per edifici ad uso residenziali i valori sono pari a 60 W per il carico sensibile e 40 W per quello latente.

I profili di utilizzo dell'edificio variano anch'essi in funzione della destinazione, ma può essere inserito un diagramma di utilizzo personalizzato, in funzione degli intervalli di presenza e assenza delle persone. I grafici seguenti illustrano i profili inseriti in ODESSE.

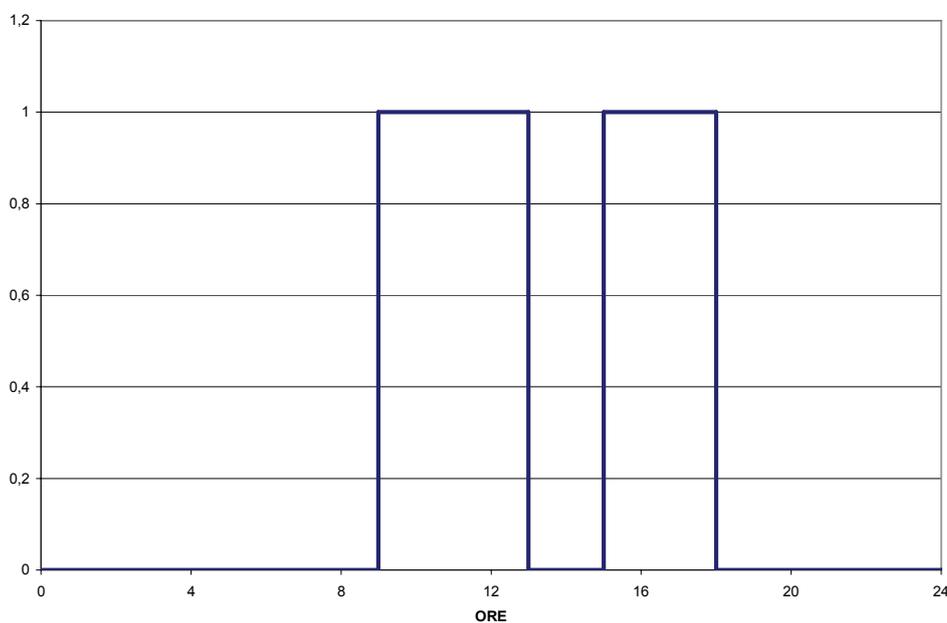


Fig 5.10 - Ufficio diagramma di utilizzo per edificio uso

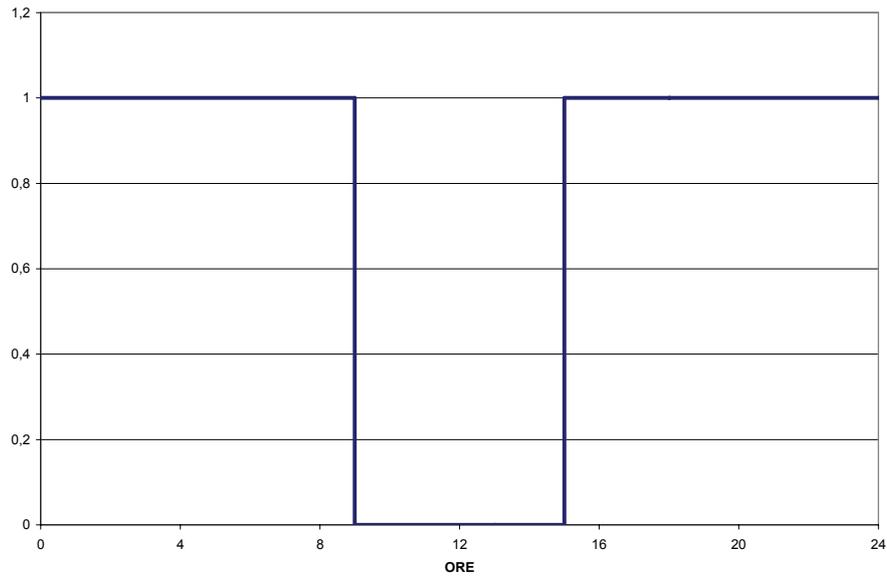


Fig 5.11 - Diagramma di utilizzo per edificio uso residenziale

La combinazione dei tre indici genera l'apporto termico totale degli occupanti all'ambiente simulato, con un diagramma giornaliero come il seguente

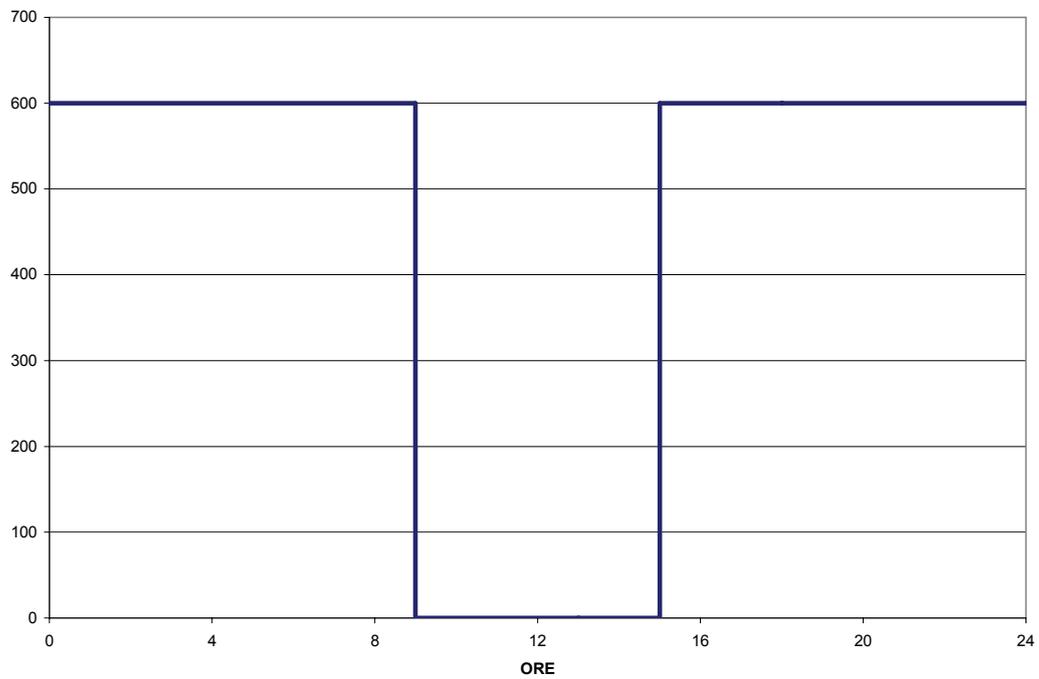


Fig 5.12 - Apporto termico totale orario per edificio residenziale - numero occupanti 10

#### 5.4.2 Apporto termico per illuminazione ( $Q_{ill}$ )

Utilizzando l'interfaccia utente, è possibile scegliere la tipologia di lampade utilizzate per illuminare la zona termica simulata.

L'apporto termico per illuminazione è dato da:

$$Q_{ill} = P S_{on\_off} f_u$$

- $P$ : è la potenza termica specifica emessa dal corpo illuminante, pari a 0,02 kW/mq per le lampade a incandescenza e 0,005 kW/mq per quelle a fluorescenza basso consumo;
- $S$ : la superficie utile della zona termica modellata;
- $on\_off$ : accensione delle lampade (0 – 1 in funzione dell'ora del giorno)
- $f_u$ : il fattore di contemporaneità, che tiene conto del fatto che non si utilizza tutta la potenza installata per l'illuminazione (il valore tipico per il residenziale è 0,65 per uffici 0,9).

Per l'apporto termico da illuminazione artificiale, viene definito un diagramma orario di utilizzo in funzione della destinazione d'uso dell'edificio simulato.

Il simulatore propone di default un diagramma orario di utilizzo dell'illuminazione artificiale per il settore residenziale e uno per il settore terziario.

Un diagramma orario per un edificio ad uso ufficio avente una superficie utile di 100 m<sup>2</sup> illuminato con lampade a fluorescenza è riportato di seguito:

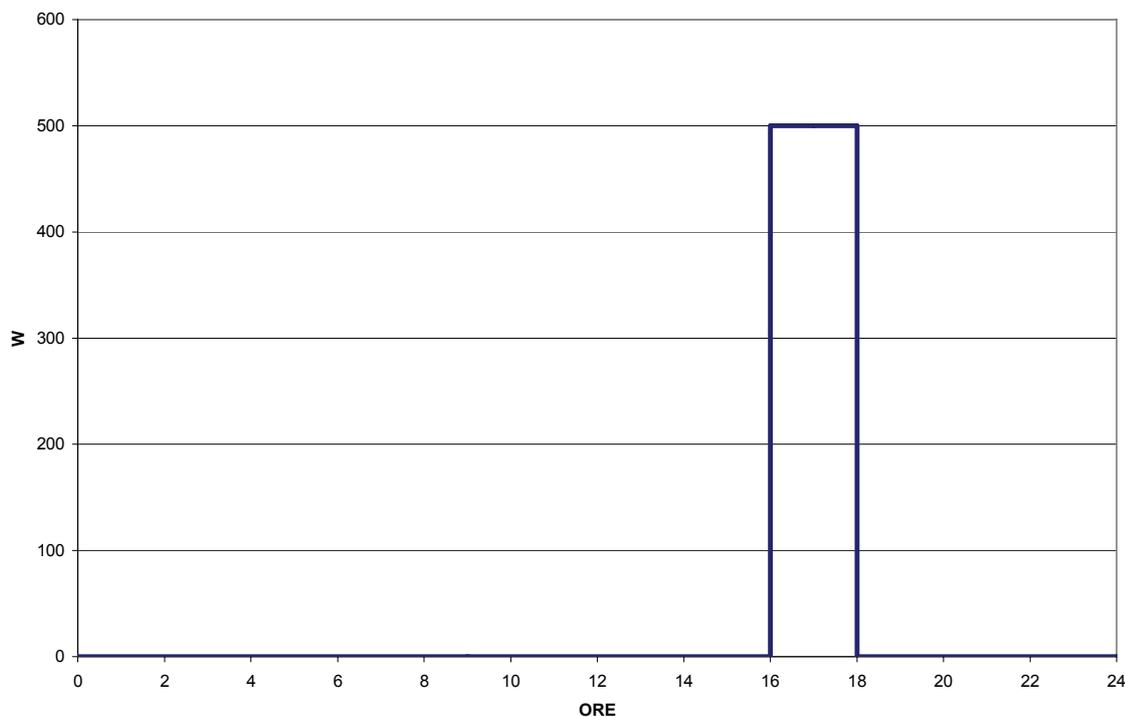


Fig 5.13 - Diagramma orario di illuminazione ufficio 100 mq - lampada a fluorescenza

Si riporta di seguito il modello in simulink utilizzato per modellare l'apporto termico delle lampade all'ambiente simulato

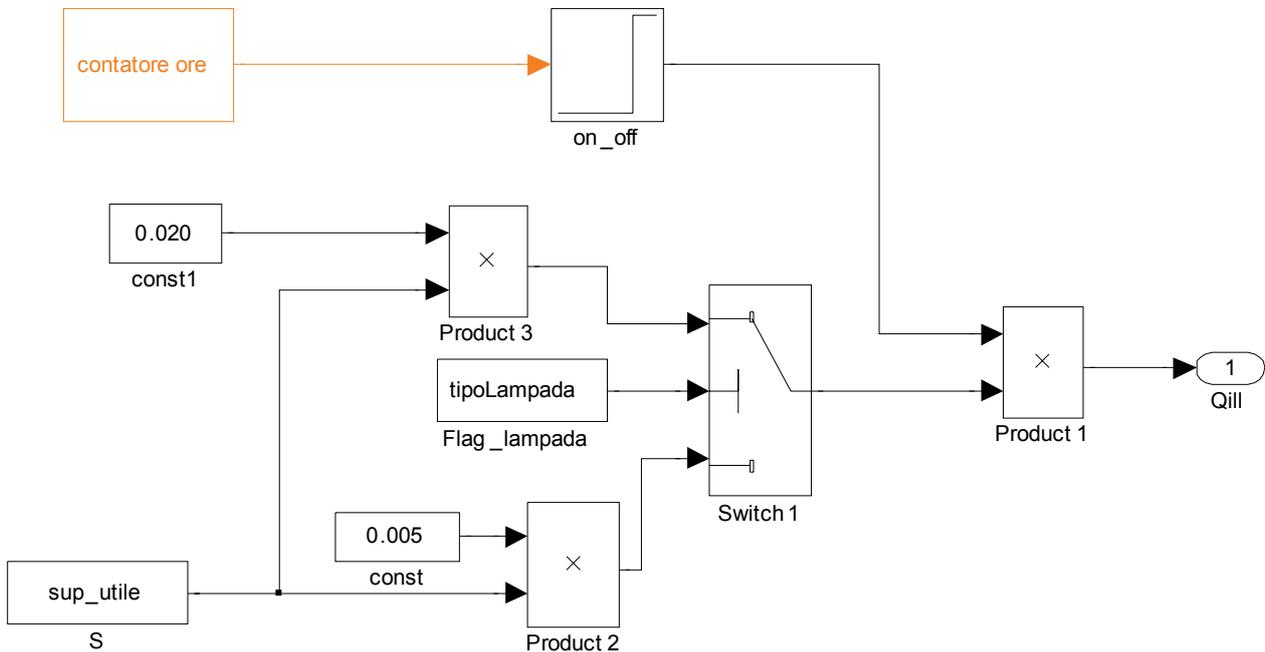


Fig 5.14 - Schema a blocchi Simulink per il calcolo dell'apporto termico per illuminazione

### 5.5 Dispersione di calore per conduzione attraverso le chiusure opache e trasparenti ( $Q_{disp}$ )

Il modello matematico dell'edificio calcola la dispersione di calore tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno ( $Q_{disp}$ ) in funzione della trasmittanza termica di ciascuna chiusura opaca e trasparente e della temperatura esterna. I valori delle trasmittanze sono calcolati secondo la norma UNI EN ISO 6946, sulla base dei valori di conduttività, densità, resistenza e permeabilità al vapore dei materiali inseriti nel database di ODESSE (vedi capitolo 3, paragrafo 3).

Tale termine di dispersione è pari a:

$$Q_{disp} = Q_{disp\_op} + Q_{disp\_fin}$$

in cui  $Q_{disp\_op}$  è riferito alle pareti opache e  $Q_{disp\_fin}$  a quelle trasparenti.

In particolare:

$$Q_{disp\_op} = \sum_i U_{pi} A_i (T_r - T_e) + \sum_i \Psi_{ki} l_{ki} (T_r - T_e) + U_{ti} A_{ti} (T_r - T_{ter}) + \Psi_{tk} l_{tk} (T_r - T_{ter})$$

dove le sommatorie sono riferite al numero di pareti opache escluso il solaio di calpestio e in cui:

$U_i$ : trasmittanza pareti opache

$A_i$ : area della parete

$T_r$ : è la temperatura di riferimento (20°C per il regime invernale)

Te: temperatura esterna

$\Psi_k$ : è il fattore lineico del ponte termico k-esimo

lk: lunghezza complessiva del ponte termico k-esimo

Ut: trasmittanza del solaio di calpestio

At: Superficie solaio di calpestio

Tter: temperatura equivalente del terreno

$$Q_{\text{disp\_fin}} = \sum_i U_{wi} A_i (T_r - T_e) + \sum_i \Psi_j l_j (T_r - T_e)$$

$\Psi_j$ : è il ponte termico j-esimo dell'infisso

lj: è la lunghezza del ponte termico j-esimo.

La trasmittanza termica totale delle pareti opache,  $U_p$ , è data dall'inverso della resistenza totale.

$$U_p = \frac{1}{R}$$

La resistenza termica R di ciascuna parete è calcolata come somma delle singole resistenze termiche dei vari strati omogenei, a cui aggiungere l'inverso della conduttanza C per gli strati non omogenei e l'inverso dei coefficienti convettivi interni ed esterni:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{C} + \frac{1}{h_e}}$$

dove

$\lambda$ : è la conduttività dei materiali costruttivi che definiscono la parete [W/(m · K)]

h: coefficiente convettivo [W/(m · K)]; la trasmissione termica dall'aria interna all'elemento costruttivo viene indicata con il coefficiente di convezione termica  $h_i$ ; la trasmissione per convezione dall'elemento costruttivo all'aria esterna è indicata con il coefficiente di convezione termica  $h_e$ . Valori tipici dei coefficienti convettivi sono (Norma UNI 10344):  $h_i = 25 \text{ W/(m · K)}$ ,  $h_e = 7,7 \text{ W/(m · K)}$ .

Per quanto riguarda le superfici trasparenti, il calcolo del coefficiente di trasmissione termica  $d$  è affidato solitamente a prove in laboratorio; in assenza di tali valori la trasmittanza  $U_w$  può essere calcolata mediante relazione fornita dalla UNI EN ISO 10077, considerando i materiali dei singoli elementi costituenti la finestra:

$$U_w = \frac{U_g * A_g + U_f * A_f}{A_g + A_f}$$

dove :

$U_g$  : trasmittanza vetro

$A_g$ : area vetro

$U_f$ : trasmittanza telaio

$A_f$ : area telaio

Si riportano di seguito le prestazioni di alcune tipologie di telai e vetri maggiormente utilizzati, come già implementati all'interno del database di ODESSE.

| <b>INFISSI</b>                      | <b>TRASMITTANZA TERMICA U<br/>(W/m<sup>2</sup> · K)</b> |
|-------------------------------------|---|
| LEGNO                               | 1,5 - 1,8   |
| LEGNO (mm 20 - 50)                  | 1,90 - 2,60   |
| ALLUMINIO SENZA TAGLIO TERMICO      | 5,2 - 7   |
| ALLUMINIO CON TAGLIO TERMICO        | 2,4 - 3,9   |
| PVC (una camera)                    | 2,8   |
| PVC (2 -3 camere)                   | 2,0 - 2,2   |
| MATERIALI MISTI (alluminio e legno) | 1,7   |

| <b>VETRI</b>         | <b>DIMENSIONI [mm]</b> | <b>TRASMITTANZA TERMICA<br/>Ug(W/m<sup>2</sup> K)</b> |
|----------------------|------------------------|---|
| Vetro semplice       | 4                      | 5,8   |
| Vetro semplice       | 8                      | 5,7   |
| doppi vetri con aria | 4 6 4                  | 3,3   |
| doppi vetri con aria | 4 9 4                  | 3   |
| doppi vetri con aria | 4 12 4                 | 2,9   |
| doppi vetri con aria | 4 15 4                 | 2,7   |
| doppi vetri con aria | 4 20 4                 | 2,7   |

Tabella 5.2: Caratteristiche infisse

## 5.6 Dispersione di calore per ventilazione e infiltrazione $Q_v$

Il carico termico dovuto all'effetto dei ricambi d'aria per ventilazione è valutato con la seguente formula:

$$Q_{vent} = \text{ventflow} \cdot \gamma \cdot c_{pa} \cdot (T_i - T_e)$$

dove:

- ventflow è la portata d'aria [ $h^{-1}$ ] corrispondente al numero di ricambi orari fissato in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e dell'attività degli occupanti, secondo la UNI 10339 (per destinazione d'uso residenziale è impostato un valore di default pari a  $0,5 h^{-1}$ )
- $C_{pa}$  il calore specifico a pressione costante dell'aria, pari a  $1000 J/(kg K)$
- $\gamma$  la densità dell'aria, pari a  $1,2 kg/m^3$
- $T_i$  la temperatura dell'aria interna
- $T_e$  la temperatura dell'aria esterna.

## 5.7 Carico termico estivo

Il calcolo del carico termico in regime estivo è ben più complesso di quello invernale perché non è possibile assumere l'ipotesi di edificio termostattizzato in quanto l'evoluzione degli scambi termici è sempre in regime transitorio. Ciò è dovuto al fatto che l'irraggiamento solare, componente che più influenza il carico termico estivo, varia notevolmente nel corso della giornata e rende molto influente l'effetto dell'inerzia termica delle pareti, che la metodologia di calcolo descritta per il carico termico invernale non riesce a riprodurre.

I grafici riportati di seguito mostrano l'errore ottenuto con questa metodologia, posta a confronto con i risultati forniti da Trnsys per due edifici di riferimento (vedi paragrafo 5.8)

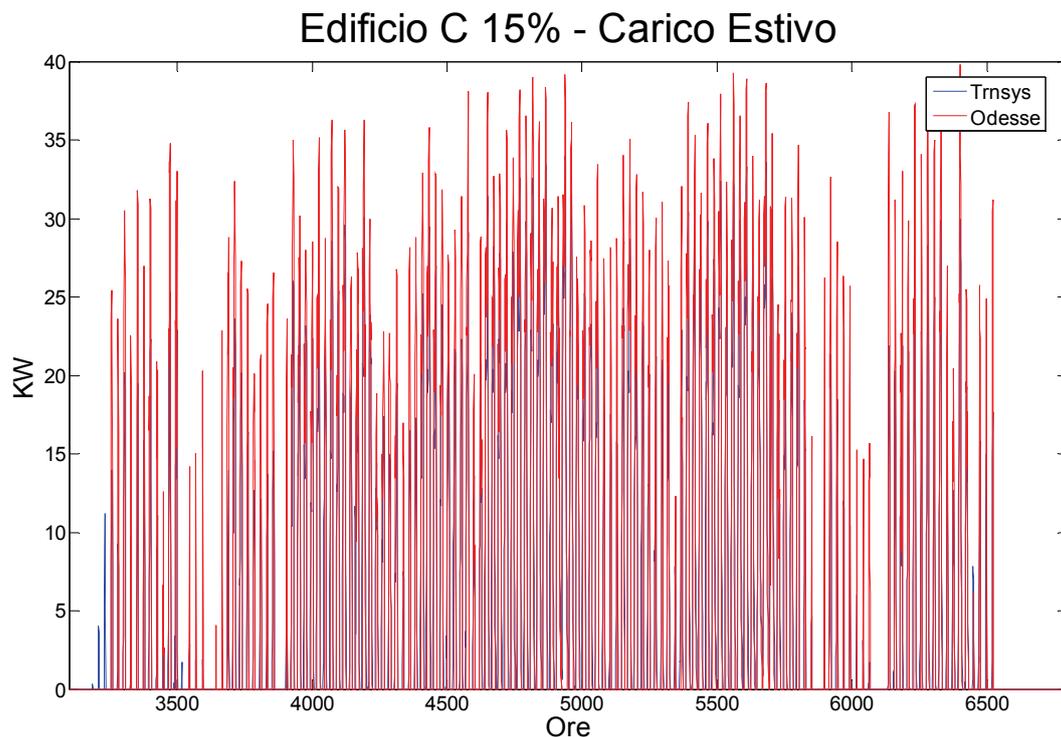


Fig 5.15 – Confronto andamenti del carico estivo

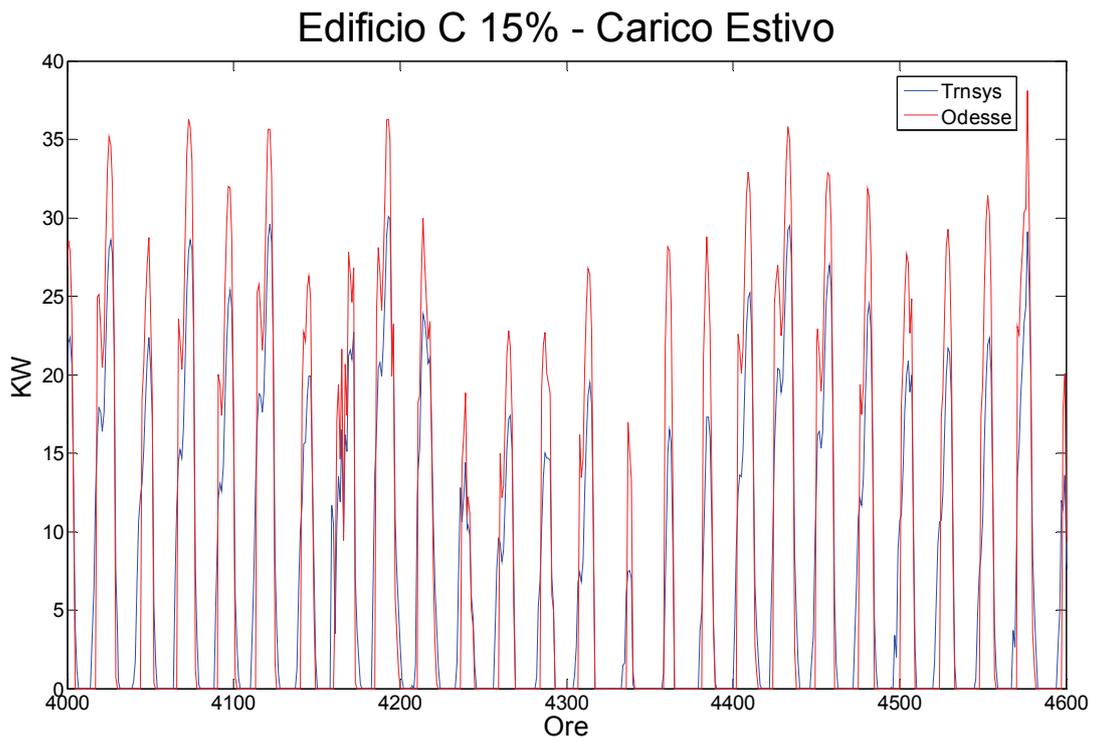


Fig 5.16 – Confronto andamenti del carico estivo (particolare)

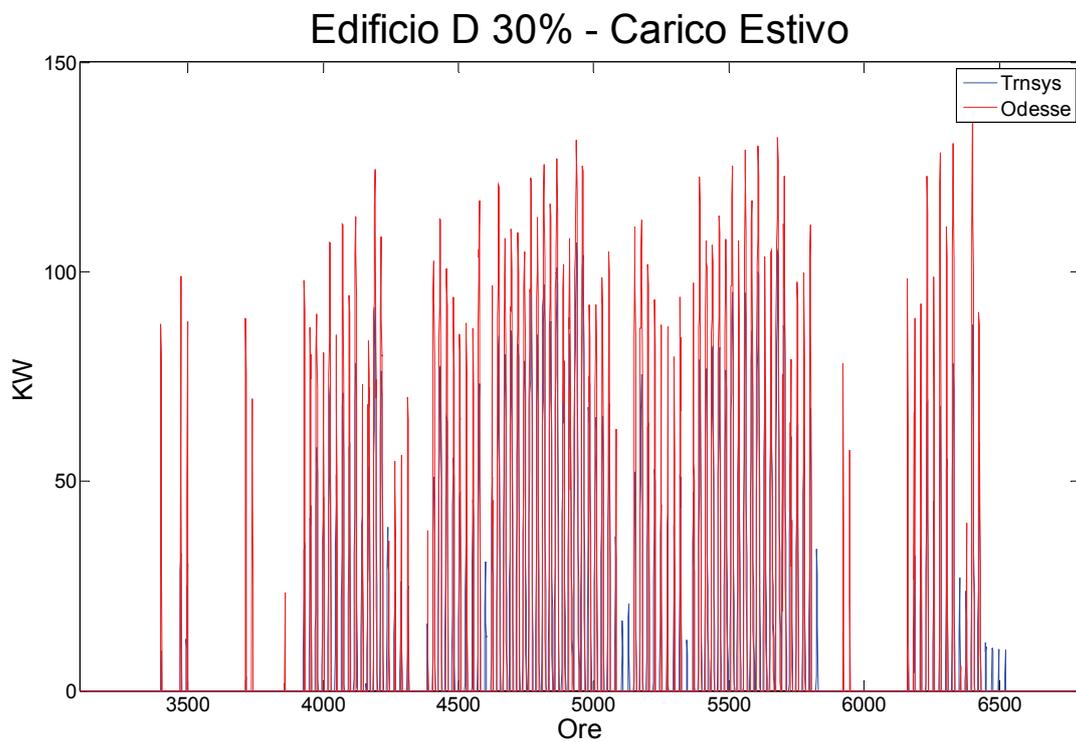


Fig 5.17 – Confronto andamenti del carico estivo

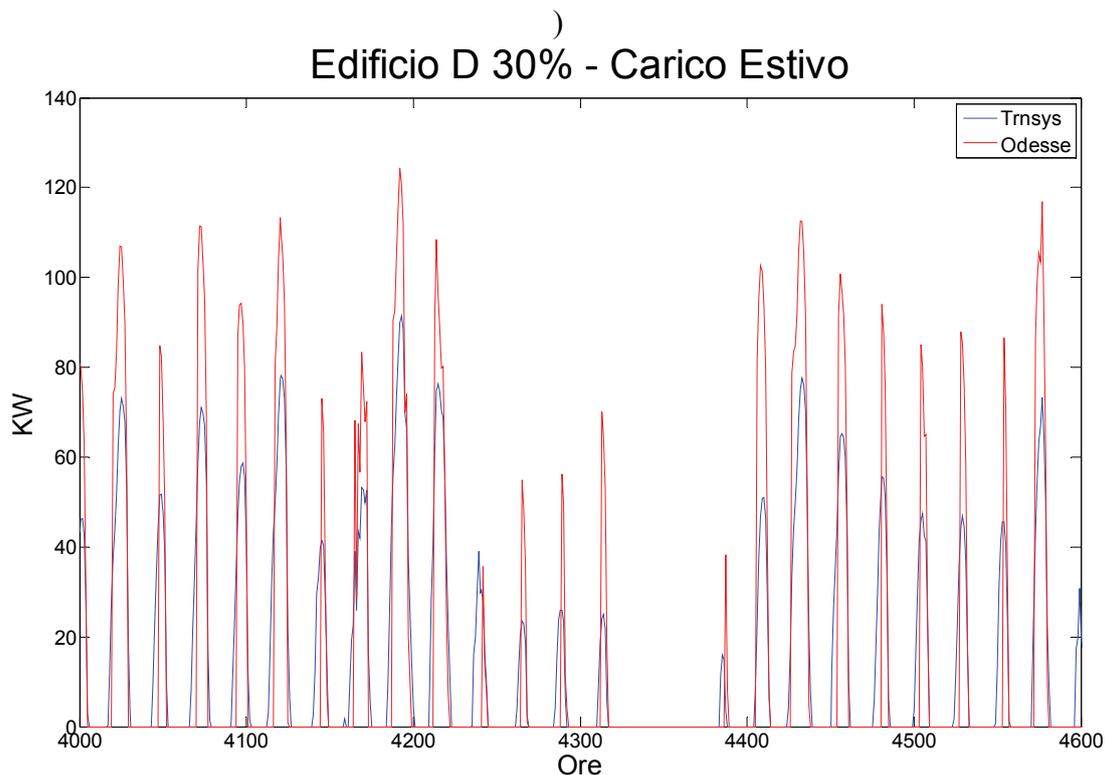


Fig 5.18 – Confronto andamenti del carico estivo (particolare)

Si è quindi deciso di implementare un altro metodo semplificato (metodo Carrier), che introduce dei fattori correttivi che tengono conto dei fenomeni inerziali e permettono di calcolare i flussi termici scambiati con le relazioni viste in precedenza. In particolare, le differenze di temperature presenti nei termini dovuti alle dispersioni attraverso le pareti opache e la ventilazione, vanno sostituite con la *differenza di temperatura equivalente*<sup>4</sup> ( $DT_e$ ), che tiene conto dell'inerzia delle pareti (e quindi dell'ambiente), dell'ora di calcolo, del giorno e del mese, dell'esposizione e della latitudine, del colore (e quindi del fattore di assorbimento). La  $DT_e$  ha un'espressione abbastanza complicata per cui in letteratura si possono trovare delle tabelle che forniscono il valore da utilizzare in funzione dell'esposizione e della massa frontale, per ciascuna ora del giorno. L'altro fattore correttivo è il *fattore di accumulo* che tiene conto del processo di accumulo termico all'interno delle strutture dell'ambiente a cui la finestra si riferisce (e, quindi, considera anche il ritardo con cui la radiazione manifesta il suo effetto). Anche questi valori sono forniti in apposite tabelle.

<sup>4</sup> È stato anche implementato il calcolo analitico della  $DT_e$  secondo l'algoritmo proposto dal Manuale ASHRAE Fundamentals 2001:

$$DT_e = \overline{T_{as}} - T_i + fa * (T_{as\delta} - \overline{T_{as}})$$

dove:

$\overline{T_{as}}$ : temperatura aria sole media giornaliera

$T_i$ : temperatura interna oraria

fa: fattore di attenuazione del flusso termico

$T_{as}$ : temperatura aria sole ritardata di un tempo  $\delta$

$\delta$ : fattore di sfasamento dell'onda termica

i fattori "fa" e "δ" sono calcolati in via semplificata utilizzando le tabelle riportate dalla UNI 10375: "Metodo di calcolo della temperatura estiva degli ambienti"

Il metodo Carrier nasce per simulare i carichi estivi massimi (non istantanei) dell'edificio, in un giorno definito per ogni mese, necessari per il dimensionamento degli impianti termici, infatti ha come dato di ingresso della radiazione il suo valore massimo. Nell'implementazione in ODESSE è stato adattato con i valori orari delle radiazioni per ogni giorno dell'anno, in modo da produrre valori istantanei (ovvero orari) del carico termico estivo.

I confronti effettuati con edifici analoghi simulati in Trnsys hanno evidenziato, tuttavia, la criticità di questo approccio nel caso di una simulazione dinamica nella determinazione dell'evoluzione temporale del carico termico, come mostrano i grafici seguenti.

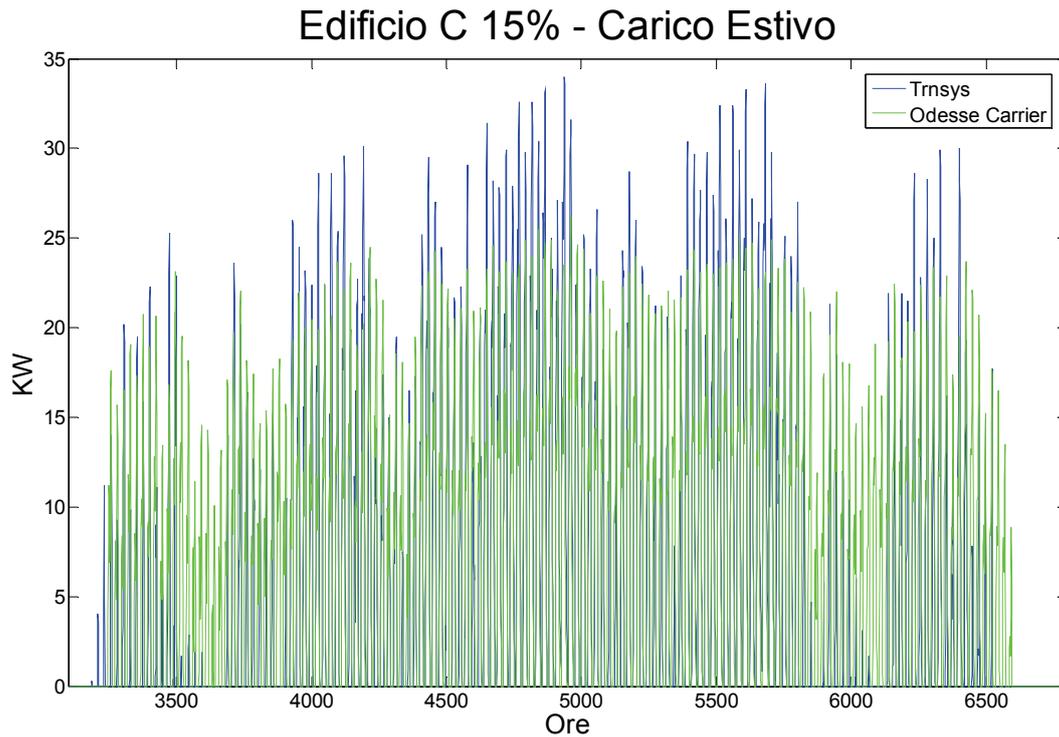


Fig 5.19 – Confronto andamenti del carico estivo

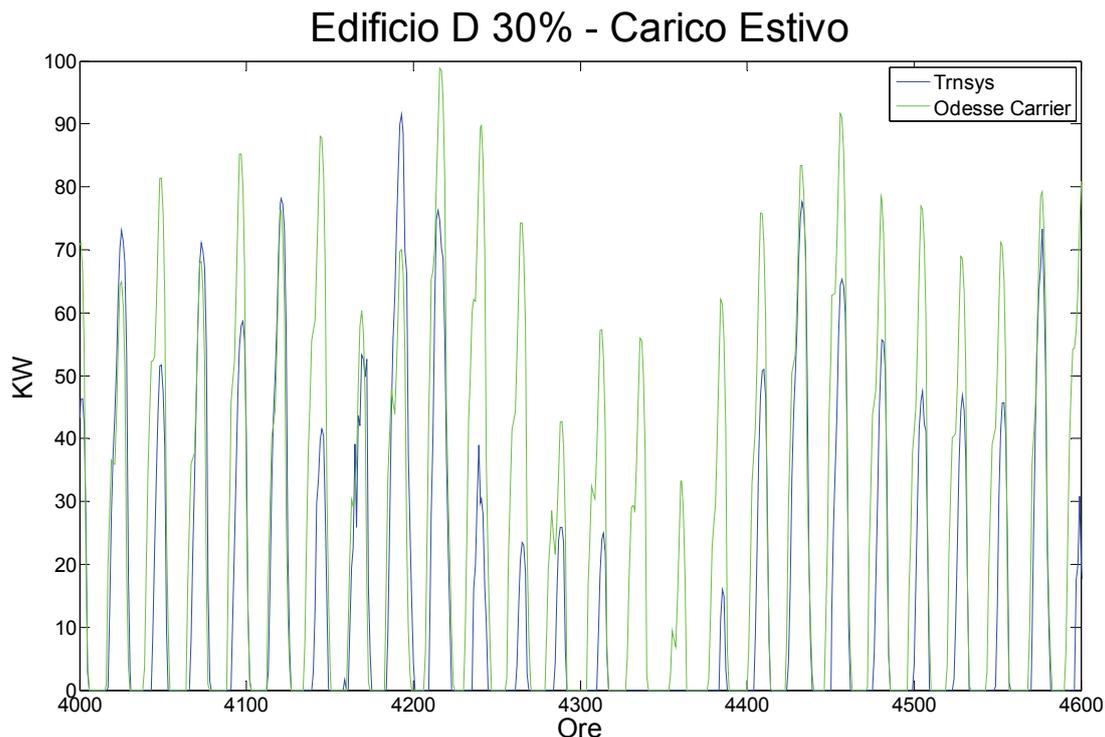


Fig 5.20 – Confronto andamenti del carico estivo (particolare)

Allo stato attuale si stanno esaminando altre metodologie non più basate su una formulazione classica dell'equazione di bilancio energetico dell'edificio, ma che tengano conto degli effetti inerziali dell'edificio. In particolare si pensa di implementare il metodo delle funzioni di trasferimento che determina i singoli flussi termici scambiati in funzione degli istanti precedenti e il carico termico totale come media pesata dei singoli flussi, in funzione di opportuni coefficienti che tengono conto degli effetti inerziali indotti dal volume dell'edificio.

### 5.8 Temperatura interna

L'andamento orario della temperatura dell'aria interna dell'edificio è regolata da un'equazione differenziale del primo ordine che permette di inglobare gli effetti delle inerzie termiche (sfasamento e attenuazione) dovuti alla tipologia dell'involucro edilizio e al suo volume.

Nella sua espressione più generale la temperatura interna  $T$  è data dall'equazione seguente:

$$\sum m_i C_i \frac{dT}{dt} = Q_g + Q_i - Q_{disp} - Q_v + Q_{aux} \quad (3)$$

in cui  $m_i$  e  $C_i$  sono, rispettivamente, la massa e la capacità termica dell'edificio, mentre i termini al secondo membro sono quelli esemplificati nei paragrafi precedenti.

Si può notare che la l'equazione (3) è formalmente analoga a quella vista per il carico termico invernale con l'aggiunta del primo membro che rappresenta l'accumulo termico dell'edificio.

La stessa equazione può essere scritta in forma canonica:

$$\frac{dT}{dt} + KT = H$$

dove H è il termine noto, calcolato con un passo temporale di un'ora e dipendente esclusivamente dai parametri termofisici dell'edificio e dato da:

$$H = \frac{Q_{gain} + (\sum (U_i A_i) + \sum_k (\Psi_k * l_k)) * t_e + ((U_t A_t) + (\Psi_t * l_t)) * t_{ter}}{\sum_i m_i * c_i}$$

K è la costante di tempo dell'edificio, dipendente esclusivamente dalle caratteristiche termofisiche dello stesso che rimangono costanti durante la simulazione, (a meno di non aggiungere componenti di involucro dinamici come materiali a cambiamento di fase) e pari a:

$$K = (Q_{gain} + (dispers + ventflow * c_p a) * T_e + (dispster) * T_{ter} + (\sum disp_{ij}) * (I * a / h_e) + Q_{aux}) / Cap$$

Schematicamente:

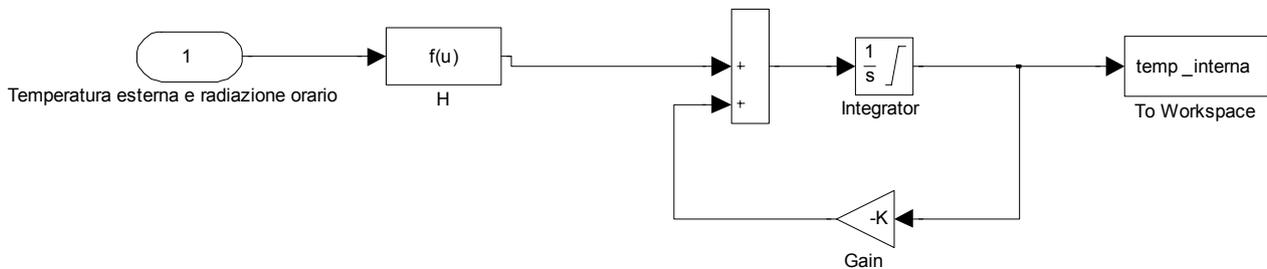


Fig. 5.21 - Schema semplificato in Simulink del risolutore dell'equazione differenziale (3) per il calcolo della temperatura interna oraria

La risoluzione dell'equazione differenziale (3) è effettuata implementando in Simulink un sistema solutore costituito dal blocco "H" in cui viene calcolato il termine noto, fornendo con cadenza oraria un vettore i cui componenti sono temperatura e radiazione solare per ciascun orientamento, e il blocco K (in valore negativo) che costituisce il guadagno dell'equazione differenziale data.

## 5.9 Validazione del modello dinamico dell'edificio

### 5.9.1 Introduzione

La validazione del modello dell'edificio è stata condotta utilizzando come benchmark un software per la simulazione dinamica degli edifici ampiamente utilizzato in ambito universitario e in ENEA: TRNSYS. Si tratta di un programma di simulazione costituito da una serie di subroutines che modellano i componenti dell'impianto e che consente di studiare il comportamento dei sistemi nel transitorio nel caso in cui le caratteristiche dei componenti siano funzione del tempo.

I modelli matematici dei singoli elementi vengono rappresentati dalle equazioni differenziali o algebriche che ne caratterizzano il comportamento, tramite l'utilizzo di blocchi, chiamate type, presenti in libreria utilizzati per simulare il comportamento energetico nelle applicazioni più diffuse.

Trnsys permette di costruire il sistema fisico da simulare connettendo tra loro le type, attraverso le grandezze di input e di output che ne caratterizzano il comportamento.

Alla base del corretto funzionamento comunque del modello è necessaria una conoscenza del modello fisico, per il funzionamento delle singole type.

Le caratteristiche termo fisiche e geometriche dell'edificio vengono inserite utilizzando un'interfaccia utente esterna chiamata TRNbuild, tramite la quale vengono definite le trasmittanze dell'involucro, le superficie finestrate e opache, il profilo di utilizzo dell'edificio, la ventilazione, la climatizzazione estiva ed invernale.

### 5.9.2 Edifici di riferimento:

- 4 tipologie con S/V variabile: 0,28; 0,4; 0,5; 0,6;

- percentuale superficie finestrate, rispetto alla totale: 15%, 30%, 60%

In totale gli edifici simulati sono 12 : quattro rapporti S/V differenti e per ognuno tre differenti percentuali di superficie finestrata rispetto alla totale superficie opaca di ciascuna giacitura verticale

|                | Edificio "A" | Edificio "B" | Edificio "C" | Edificio "D" |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Larghezza (m)  | 10           | 10           | 10           | 50           |
| Altezza (m)    | 10           | 10           | 20           | 10           |
| Profondità (m) | 10           | 20           | 20           | 50           |
| <b>S/V</b>     | <b>0,6</b>   | <b>0,5</b>   | <b>0,4</b>   | <b>0,28</b>  |

Tabella 5.3 - Edifici di riferimento per il confronto ODESSE-TRNSYS

Si riportano di seguito le schede tecniche dettagliate dei quattro edifici con le relative percentuali di superficie finestrata.

|                            |                    | edificio "A" |        |        | edificio "B" |        |        | edificio "C" |        |        | edificio "D" |        |        |
|----------------------------|--------------------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| % finestratura             |                    | 15%          | 30%    | 60%    | 15%          | 30%    | 60%    | 15%          | 30%    | 60%    | 15%          | 30%    | 60%    |
| Altezza (h)                | m                  | 10           | 10     | 10     | 10           | 10     | 10     | 20           | 20     | 20     | 10           | 10     | 10     |
| Lunghezza (L)              | m                  | 10           | 10     | 10     | 10           | 10     | 10     | 10           | 10     | 10     | 50           | 50     | 50     |
| Profondità (P)             | m                  | 10           | 10     | 10     | 20           | 20     | 20     | 20           | 20     | 20     | 50           | 50     | 50     |
| numero piani               |                    | 3            | 3      | 3      | 3            | 3      | 3      | 3            | 3      | 3      | 3            | 3      | 3      |
| Trasmittanza parete        | W/m <sup>2</sup> K | 0,326        | 0,326  | 0,326  | 0,326        | 0,326  | 0,326  | 0,326        | 0,326  | 0,326  | 0,326        | 0,326  | 0,326  |
| Massa Frontale             | kg/m <sup>2</sup>  | 379          | 379    | 379    | 379          | 379    | 379    | 379          | 379    | 379    | 379          | 379    | 379    |
| Trasmittanza infissi       | W/m <sup>2</sup> K | 2,29         | 2,29   | 2,29   | 2,29         | 2,29   | 2,29   | 2,29         | 2,29   | 2,29   | 2,29         | 2,29   | 2,29   |
| <b>PARETI NORD/SUD</b>     |                    |              |        |        |              |        |        |              |        |        |              |        |        |
| Superficie Totale          | m <sup>2</sup>     | 100          | 100    | 100    | 100          | 100    | 100    | 200          | 200    | 200    | 500          | 500    | 500    |
| Superficie Opaca           | m <sup>2</sup>     | 85           | 70     | 40     | 85           | 70     | 40     | 170          | 140    | 80     | 425          | 350    | 200    |
| Superficie Trasparente     | m <sup>2</sup>     | 15           | 30     | 60     | 15           | 30     | 60     | 30           | 60     | 120    | 75           | 150    | 300    |
| <b>PARETI EST/OVEST</b>    |                    |              |        |        |              |        |        |              |        |        |              |        |        |
| Superficie Totale          | m <sup>2</sup>     | 100          | 100    | 100    | 200          | 200    | 200    | 400          | 400    | 400    | 500          | 500    | 500    |
| Superficie Opaca           | m <sup>2</sup>     | 85           | 70     | 40     | 170          | 140    | 80     | 340          | 280    | 160    | 425          | 350    | 200    |
| Superficie Trasparente     | m <sup>2</sup>     | 15           | 30     | 60     | 30           | 60     | 120    | 60           | 120    | 240    | 75           | 150    | 300    |
| <b>SOLAIO DI CALPESTIO</b> |                    |              |        |        |              |        |        |              |        |        |              |        |        |
| Superficie Totale          | m <sup>2</sup>     | 100          | 100    | 100    | 200          | 200    | 200    | 200          | 200    | 200    | 2500         | 2500   | 2500   |
| Massa Frontale             | kg/m <sup>2</sup>  | 551,80       | 551,80 | 551,80 | 551,80       | 551,80 | 551,80 | 551,80       | 551,80 | 551,80 | 551,80       | 551,80 | 551,80 |
| Trasmittanza               | W/m <sup>2</sup> K | 0,362        | 0,362  | 0,362  | 0,362        | 0,362  | 0,362  | 0,362        | 0,362  | 0,362  | 0,362        | 0,362  | 0,362  |
| <b>SOLAIO DI COPERTURA</b> |                    |              |        |        |              |        |        |              |        |        |              |        |        |
| Superficie Totale          | m <sup>2</sup>     | 100          | 100    | 100    | 200          | 200    | 200    | 200          | 200    | 200    | 2500         | 2500   | 2500   |
| Massa Frontale             | kg/m <sup>2</sup>  | 556,20       | 556,20 | 556,20 | 556,20       | 556,20 | 556,20 | 556,20       | 556,20 | 556,20 | 556,20       | 556,20 | 556,20 |
| Trasmittanza               | W/m <sup>2</sup> K | 0,322        | 0,322  | 0,322  | 0,322        | 0,322  | 0,322  | 0,322        | 0,322  | 0,322  | 0,322        | 0,322  | 0,322  |

Tabella 5.4 - Caratteristiche geometriche degli edificio tipo

Nelle seguenti tabelle sono riportati i dati caratteristici di input dell'involucro edilizio utilizzati come input comuni per TRNSYS e ODESSE

| <b>Caratteristiche strutturali parete esterna</b> |             |                      |                        |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|---|-------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|   | s           | $\lambda$            | $\lambda$              | $\rho$               | massa frontale       | resistenza           | hi                   | he                   | trasmissione         |
|   | (m)         | (W/m <sup>2</sup> K) | (KJ/hm <sup>2</sup> K) | (Kg/m <sup>3</sup> ) | (Kg/m <sup>2</sup> ) | (m <sup>2</sup> K/W) | (W/m <sup>2</sup> K) | (W/m <sup>2</sup> K) | (W/m <sup>2</sup> K) |
| Intonaco interno (97)                             | 0,02        | 0,700                | 2,52                   | 1400,00              | 28,00                | 0,029                | 7,70                 |                      |                      |
| Forato (107)                                      | 0,08        | 0,590                | 2,12                   | 1600,00              | 128,00               | 0,136                |                      |                      |                      |
| Isolante (159)                                    | 0,05        | 0,040                | 0,14                   | 30,00                | 1,50                 | 1,250                |                      |                      |                      |
| Barriera al vapore (154)                          | 0,06        | 0,048                | 0,17                   | 33,00                | 1,98                 | 1,250                |                      |                      |                      |
| Forato (107)                                      | 0,12        | 0,590                | 2,12                   | 1600,00              | 192,00               | 0,203                |                      |                      |                      |
| Intonaco esterno (97)                             | 0,02        | 0,700                | 2,52                   | 1400,00              | 28,00                | 0,029                |                      | 25                   |                      |
| <b>Totale</b>                                     | <b>0,35</b> |                      |                        |                      | <b>379,48</b>        | <b>3,07</b>          |                      |                      | <b>0,326</b>         |

| <b>Caratteristiche strutturali solaio calpestio (su pilotis)</b> |              |           |           |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|--|--------------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|  | s            | $\lambda$ | $\lambda$ | $\rho$               | massa frontale       | resistenza           | hi                   | he                   | trasmissione         |
|  | (m)          | (W/mK)    | (KJ/hmK)  | (Kg/m <sup>3</sup> ) | (Kg/m <sup>2</sup> ) | (m <sup>2</sup> K/W) | (W/m <sup>2</sup> K) | (W/m <sup>2</sup> K) | (W/m <sup>2</sup> K) |
| Piastrella porcellana (237)                                      | 0,020        | 1,000     | 3,600     | 2300,000             | 46,000               | 0,020                | 7,70                 |                      |                      |
| Allettamento cls (21)  | 0,040        | 1,480     | 5,328     | 2200,000             | 88,000               | 0,027                |                      |                      |                      |
| Malta cementizia di sottofondo (99)                              | 0,060        | 1,400     | 5,040     | 2000,000             | 120,000              | 0,043                |                      |                      |                      |
| Isolante (174)   | 0,070        | 0,032     | 0,115     | 40,000               | 2,800                | 2,188                |                      |                      |                      |
| Solaio laterocemento (420)                                       | 0,220        | 0,667     | 2,400     | 1800,000             | 267,000              | 0,330                |                      |                      |                      |
| Intonaco (97)  | 0,020        | 0,700     | 2,520     | 1400,000             | 28,000               | 0,029                |                      | 25                   |                      |
| <b>Totale</b>  | <b>0,430</b> |           |           |                      | <b>551,80</b>        | <b>2,766</b>         |                      |                      | <b>0,362</b>         |

| <b>Caratteristiche strutturali solaio copertura</b> |              |           |           |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|---|--------------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|   | s            | $\lambda$ | $\lambda$ | $\rho$               | massa frontale       | resistenza           | hi                   | he                   | trasmissione         |
|   | (m)          | (W/mK)    | (KJ/hmK)  | (Kg/m <sup>3</sup> ) | (Kg/m <sup>2</sup> ) | (m <sup>2</sup> K/W) | (W/m <sup>2</sup> K) | (W/m <sup>2</sup> K) | (W/m <sup>2</sup> K) |
| Intonaco(97)  | 0,02         | 0,700     | 2,52      | 1400,00              | 28,00                | 0,03                 | 7,70                 |                      |                      |
| Solaio laterocemento (420)                          | 0,22         | 0,667     | 2,40      | 1800                 | 267,0                | 0,330                |                      |                      |                      |
| Isolante (174)                                      | 0,08         | 0,032     | 0,12      | 40,00                | 3,20                 | 2,50                 |                      |                      |                      |
| Malta cementizia di sottofondo (99)                 | 0,06         | 1,400     | 5,04      | 2000,00              | 120,00               | 0,04                 |                      |                      |                      |
| Allettamento cls (21)                               | 0,030        | 1,480     | 5,33      | 2200,000             | 66                   | 0,020                |                      |                      |                      |
| pavimento cls (22)                                  | 0,030        | 1,910     | 6,88      | 2400                 | 72                   | 0,016                |                      | 25                   |                      |
| <b>Totale</b>                                       | <b>0,440</b> |           |           |                      | <b>556,20</b>        | <b>3,107</b>         |                      |                      | <b>0,322</b>         |

Tabella 5.5 - Caratteristiche termofisiche degli edificio tipo

Si riportano di seguito i valori di trasmissione dell'infilso adottato per ciascuna giacitura dell'involucro edilizio in cui  $A_w$  è l'area totale dell'infilso,  $A_g$  quella del vetro e  $A_f$  quella del telaio:

**EDIFICIO "A" : 15%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$ |
|-----------|--------------------|--------|--------|-------|
| Nord-Sud  | 100                | 15,000 | 10,636 | 4,364 |
| Est-Ovest | 100                | 15,000 | 10,636 | 4,364 |

**EDIFICIO "A" : 30%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$ |
|-----------|--------------------|--------|--------|-------|
| Nord-Sud  | 100                | 30,000 | 21,273 | 8,727 |
| Est-Ovest | 100                | 30,000 | 21,273 | 8,727 |

**EDIFICIO "A" : 60%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$  |
|-----------|--------------------|--------|--------|--------|
| Nord-Sud  | 100                | 60,000 | 42,545 | 17,455 |
| Est-Ovest | 100                | 60,000 | 42,545 | 17,455 |

**EDIFICIO "B" : 15%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$ |
|-----------|--------------------|--------|--------|-------|
| Nord-Sud  | 100                | 15,000 | 10,636 | 4,364 |
| Est-Ovest | 200                | 30,000 | 21,273 | 8,727 |

**EDIFICIO "B" : 30%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$  |
|-----------|--------------------|--------|--------|--------|
| Nord-Sud  | 100                | 30,000 | 21,273 | 8,727  |
| Est-Ovest | 200                | 60,000 | 42,545 | 17,455 |

**EDIFICIO "B" : 60%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$   | $A_g$  | $A_f$  |
|-----------|--------------------|---------|--------|--------|
| Nord-Sud  | 100                | 60,000  | 42,545 | 17,455 |
| Est-Ovest | 200                | 120,000 | 85,091 | 34,909 |

**EDIFICIO "C" : 15%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$  |
|-----------|--------------------|--------|--------|--------|
| Nord-Sud  | 200                | 30,000 | 21,273 | 8,727  |
| Est-Ovest | 400                | 60,000 | 42,545 | 17,455 |

**EDIFICIO "C" : 30%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$   | $A_g$  | $A_f$  |
|-----------|--------------------|---------|--------|--------|
| Nord-Sud  | 200                | 60,000  | 42,545 | 17,455 |
| Est-Ovest | 400                | 120,000 | 85,091 | 34,909 |

**EDIFICIO "C" : 60%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$   | $A_g$   | $A_f$  |
|-----------|--------------------|---------|---------|--------|
| Nord-Sud  | 200                | 120,000 | 85,091  | 34,909 |
| Est-Ovest | 400                | 240,000 | 170,182 | 69,818 |

**EDIFICIO "D" : 15%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$  | $A_g$  | $A_f$  |
|-----------|--------------------|--------|--------|--------|
| Nord-Sud  | 500                | 75,000 | 53,182 | 21,818 |
| Est-Ovest | 500                | 75,000 | 53,182 | 21,818 |

**EDIFICIO "D" : 30%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$   | $A_g$   | $A_f$  |
|-----------|--------------------|---------|---------|--------|
| Nord-Sud  | 500                | 150,000 | 106,364 | 43,636 |
| Est-Ovest | 500                | 150,000 | 106,364 | 43,636 |

**EDIFICIO "D" : 60%**

|           | Area Totale Parete | $A_w$   | $A_g$   | $A_f$  |
|-----------|--------------------|---------|---------|--------|
| Nord-Sud  | 500                | 300,000 | 212,727 | 87,273 |
| Est-Ovest | 500                | 300,000 | 212,727 | 87,273 |

Tabella 5.6 - Caratteristiche geometriche infissi

**Ipotesi e condizioni di riferimento:**

- Odesse: edificio semplificato, singola zona
- Trnsys: edificio "complesso", singola zona (type 56)

- dati di ingresso (temperatura ambiente, irraggiamento sulle superfici) generati dal processore solare di Trnsys
- Guadagni interni e carico latente nulli,  $Q_{int} = Q_{lat} = 0$ .

### 5.9.3 Risultati del confronto TRNSYS – ODESSE per il periodo invernale

Al fine di validare il modello matematico dell'edificio sono stati confrontati i singoli componenti che costituiscono il carico termico totale dell'edificio e il fabbisogno termico totale annuo per il riscaldamento.

Si riporta di seguito il confronto tra orario tra i singoli componenti che costituiscono il carico termico estivo dell'edificio.

In particolare per una migliore lettura del confronto, si riporta l'andamento di una settimana del periodo di riscaldamento per la zona climatica di Roma (dal giorno 328 al giorno 335 dell'anno solare) per l'edificio A con 30 % di superficie finestrata per ciascuna giacitura:

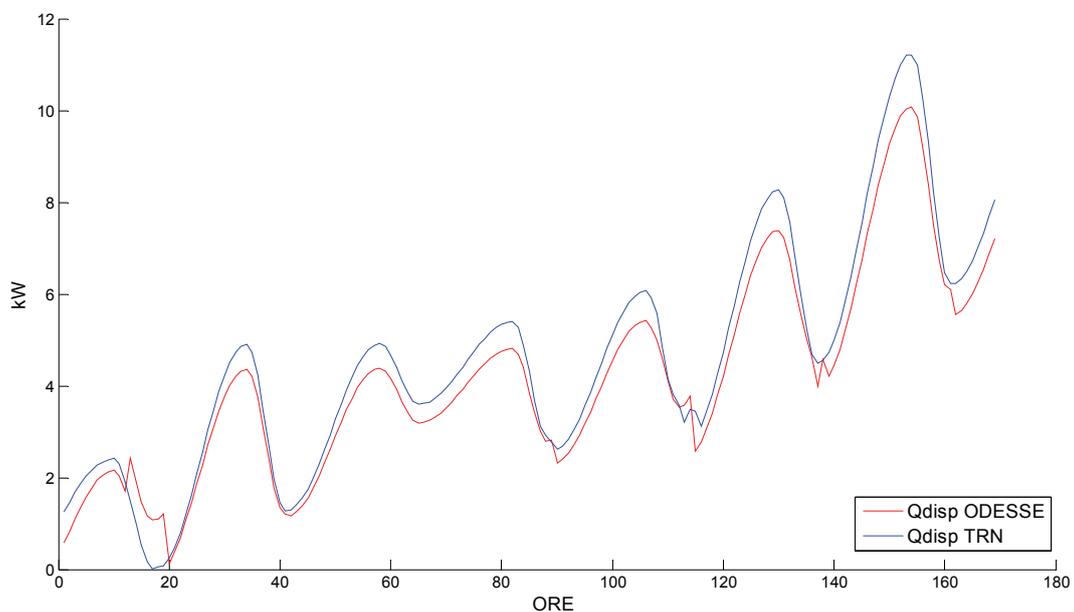


Fig. 5.22 - Dispersione termica per conduzione attraverso l'involucro edilizio (Qdisp)

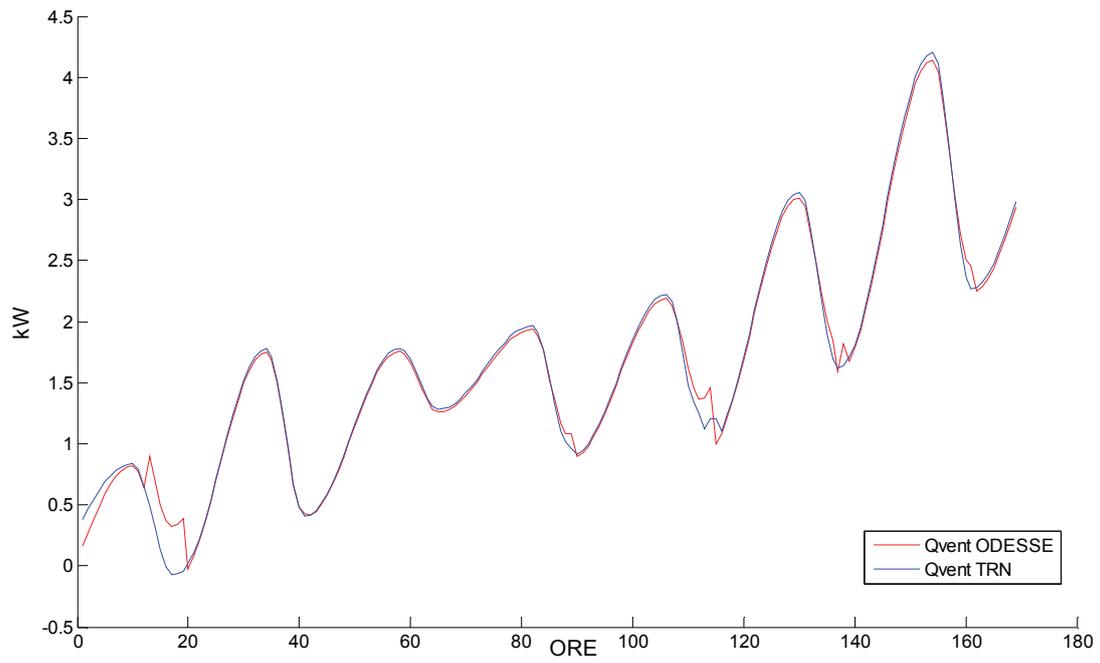


Fig. 5.23 - Dispersione termica per ricambi d'aria con l'esterno - 0,5 h-1 - (Qvent)

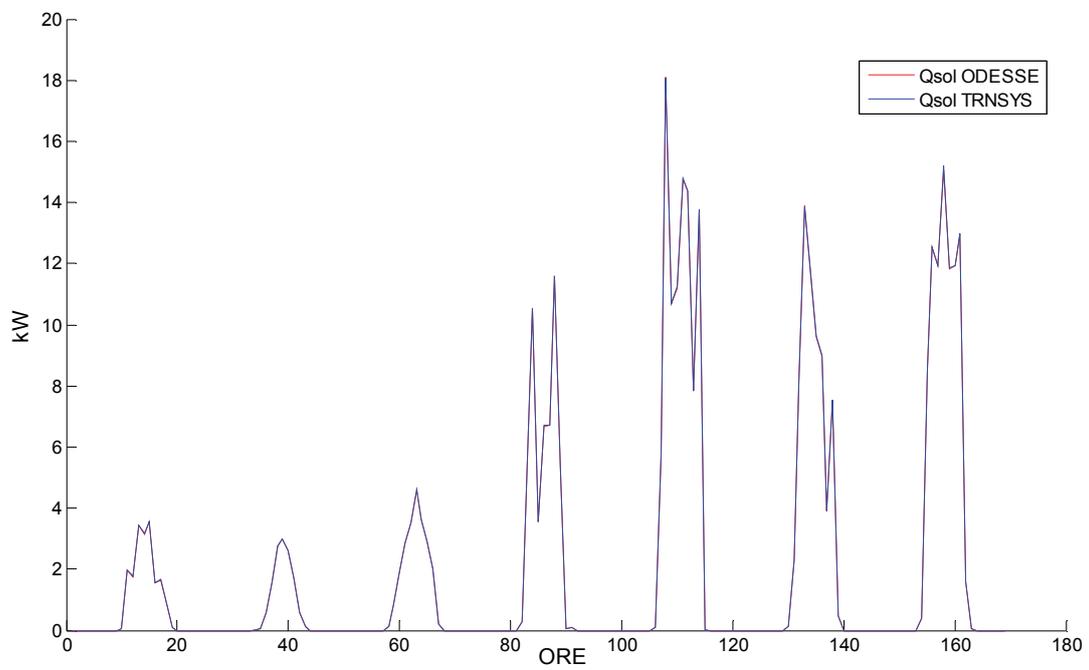


Fig. 5.24 - Apporto termico solare (SHGC) attraverso le finestre (Qsol)

Come si evince dalla precedente figura, la componente solare calcolata da ODESSE coincide con la componente calcolata con la Type 56 di TRNSYS. Per i due codici di simulazione dinamica è stato utilizzata la stessa tipologia di infisso con uguale valore del coefficiente di trasmissione e assorbimento in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare. La sovrapposizione delle due componenti consente di validare l'algoritmo utilizzato in ODESSE per il calcolo della componente solare incidente sulla superficie finestrata e trasmessa all'interno della zona termica.

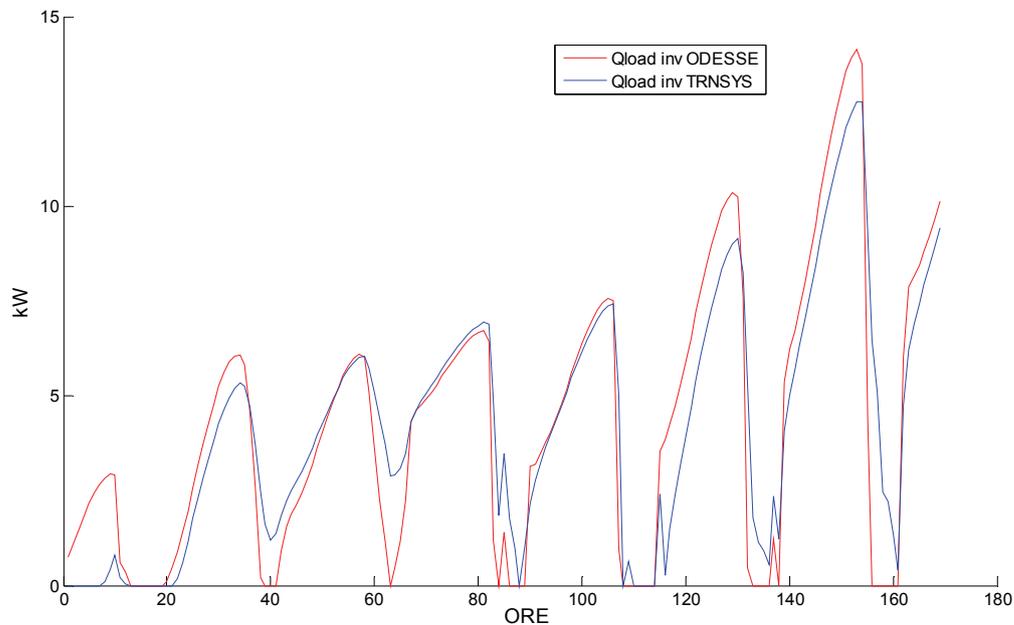


Figura 5.25: Carco termico totale invernale orario (Qload\_inv)

Al fine di qualificare il modello dinamico dell'edificio implementato in ODESSE è stato calcolato l'errore relativo sul fabbisogno termico per il riscaldamento rispetto a TRNSYS.

Come si evince dalla seguente tabella l'errore massimo del fabbisogno termico per riscaldamento annuo rispetto a TRNSYS (per l'edificio A con 30% di superficie finestrata) è inferiore al 10%.

|                | TRNSYS        |           | ODESSE        |           | errore % |
|----------------|---------------|-----------|---------------|-----------|----------|
|                | Qload_inv_max | Eload_inv | Qload_inv_max | Eload_inv |          |
|                | [kW]          | [kWh/a]   | [kW]          | [kWh/a]   | Eload    |
| Edificio_A_15% | 9.73          | 13416     | 11.23         | 13881     | 3.4%     |
| Edificio_A_30% | 12.77         | 15008     | 14.14         | 16571     | 9.4%     |
| Edificio_A_60% | 18.41         | 20940     | 19.95         | 22579     | 7.3%     |
| Edificio_B_15% | 17.00         | 24741     | 19.39         | 24513     | -0.9%    |
| Edificio_B_30% | 21.63         | 26955     | 23.75         | 28228     | 4.5%     |
| Edificio_B_60% | 30.28         | 35420     | 32.48         | 37043     | 4.4%     |
| Edificio_C_15% | 32.89         | 46084     | 36.82         | 45741     | -0.8%    |
| Edificio_C_30% | 42.03         | 51739     | 45.55         | 53389     | 3.1%     |
| Edificio_C_60% | 58.60         | 70547     | 62.98         | 71155     | 0.9%     |
| Edificio_D_15% | 144.27        | 240278    | 158.02        | 227517    | -5.6%    |
| Edificio_D_30% | 159.65        | 239526    | 172.57        | 229714    | -4.3%    |
| Edificio_D_60% | 190.25        | 251203    | 201.65        | 249430    | -0.7%    |

Tabella 5.7 - Risultati confronto ODESSE TRNSYS (periodo invernale)

## 6. Sviluppi futuri

Nel prosieguo del programma di ricerca le attività di sviluppo si focalizzeranno sulla validazione dell'algoritmo del carico termico estivo e sulla risoluzione di alcune problematiche ad esso connesse, al fine di raggiungere un grado di accuratezza rispetto ai software dinamici complessi attualmente in commercio (vedi cap. 2) adeguato e che si ritiene essere corrispondente ad un errore inferiore al 10%. Si ritiene accettabile tale vincolo, come già spiegato nei paragrafi precedenti, perché l'obiettivo di ODESSE è quello di facilitare la progettazione ad ampia scala (distretto energetico), che vede il sistema edificio-impianti come elemento base.

Inoltre, si darà luogo alla realizzazione dell'integrazione all'interno della piattaforma dei vari modelli matematici di impianti, che sono stati implementati dai partners universitari che hanno collaborato all'attività scientifica del tema di ricerca all'interno del quale anche il presente lavoro è stato svolto.

L'implementazione di tali modelli ha permesso ai vari partners di lavorare a stretto contatto con l'ENEA realizzando un interessante network di eccellenza sui temi specifici di ricerca. E' intenzione di ENEA e degli altri partecipanti di allargare tale network ad altri operatori del settore sia dal punto di vista industriale (produttori di componenti ed impianti), sia dal punto di vista istituzionale (enti locali, PA, APE) che commerciale (ESCo) allo scopo di promuovere le tecnologie innovative efficienti in un mercato economicamente virtuoso e foriero di benefici risultati in termini di riduzione dei consumi energetici.

Le attività svolte nelle varie collaborazioni si sono articolate nel seguente modo:

- l'Università di Palermo, dipartimento DREAM, ha prodotto lo sviluppo di algoritmi per la modellizzazione di componenti meccanici e di variabili ambientali per la simulazione dinamica di Unità di Trattamento Aria del tipo Solar DEC e per il loro interfacciamento con i carichi esterni e con componentistiche ausiliarie presenti nella piattaforma di sviluppo;
- l'Università di Roma "La Sapienza", dipartimento CITERA, monitoraggio ed analisi di campagne sperimentali per la validazione del modello per il microgeneratore e definizione di indicatori di valutazione;
- l'Università del Salento, dipartimento DII, ha realizzato lo sviluppo di algoritmi per la modellizzazione di impianti geotermici;
- il Politecnico di Milano, dipartimento DIE, ha prodotto modelli Simulink per la simulazione dei moderni impianti di solar cooling, collettori e chiller;
- l'Università ROMATRE, dipartimento DIA, ha realizzato la parametrizzazione del sistema di controllo (PID) degli impianti modellati all'interno della piattaforma di simulazione ODESSE e realizzazione di un sistema di gestione ottimale del sistema di poli-generazione;
- il Politecnico di Milano, dipartimento BEST, ha prodotto una selezione di modelli per la progettazione e ottimizzazione energetica a scala urbana.

## **Appendice A: Ambiente di sviluppo**

### **A.1 Simulink**

Simulink® è un ambiente di programmazione grafico associato a MATLAB®. E' particolarmente indicato per costruire schemi a blocchi di sistemi dinamici lineari e non lineari e per eseguire la loro simulazione. Mette a disposizione una grande serie di moduli predefiniti, con la possibilità di crearne di nuovi, eventualmente anche programmati in "C" o "Fortran".

#### **Schema a blocchi**

Graficamente uno schema a blocchi del modello di un sistema dinamico consiste di blocchi e linee (segnali). La storia di questa modellazione attraverso diagramma a blocchi proviene da settori di ingegneria come la teoria del controllo attraverso feedback e il Signal Processing. Un blocco all'interno di un diagramma definisce un sistema dinamico in sé. Le relazioni tra ogni elementare sistema dinamico sono illustrati mediante l'uso di segnali che collegano i blocchi. Collettivamente i blocchi e le linee in un diagramma a blocchi descrivono l'intero sistema dinamico.

Simulink® estende questo classico modello di schema a blocchi, introducendo il concetto di due categorie di blocchi, blocchi *non-virtuali* e blocchi *virtuali*. I blocchi *non-virtuali* rappresentano sistemi elementari. I blocchi *virtuali* esistono solo per convenienza grafica e organizzativa: essi non hanno alcun effetto sul sistema di equazioni descritte dal diagramma a blocchi modello. È possibile utilizzare i blocchi virtuali per migliorare la leggibilità del modello.

In generale, i blocchi e le linee possono essere usati per descrivere molti "modelli di calcolo".

Il termine "time-based block diagram" viene utilizzato per distinguere i diagrammi a blocchi che descrivono i sistemi dinamici dalle altre forme di diagrammi a blocchi, e il termine diagramma a blocchi (o modello) è utilizzato per fare riferimento a un "time-based block diagram" a meno che il contesto richieda esplicita distinzione.

#### **Creazione dei modelli**

Simulink fornisce un editor grafico che consente di creare e collegare le istanze di blocchi, selezionati da librerie, tramite l'uso di un browser di tipologie di blocchi. I vari blocchi rappresentano sistemi elementari che possono essere utilizzati come elementi costitutivi. I blocchi in dotazione con Simulink sono chiamati built-in blocks. Si possono inoltre creare i propri tipi di blocchi personalizzati e usare il Simulink editor per creare le loro istanze in un diagramma.

#### **Tempo**

Il tempo è una componente intrinseca dei diagrammi a blocchi in modo che i risultati di una simulazione cambiano con il tempo. In altre parole, uno schema a blocchi rappresenta l'istantanea del comportamento di un sistema dinamico. Determinare il comportamento di un sistema nel tempo comporta quindi risolvere ripetutamente il modello, ad intervalli, chiamati *time steps*, a partire dall'inizio fino alla fine del periodo di simulazione. Il processo di soluzione di un modello a successivi *time steps* viene indicato come la simulazione del sistema che il modello rappresenta.

#### **Stati**

Tipicamente i valori correnti di alcune uscite del sistema e, di conseguenza del modello, sono funzioni dei precedenti valori delle variabili temporali. Tali variabili sono chiamati stati. Il calcolo delle uscite di un modello di un diagramma a blocchi comporta quindi il salvataggio del valore degli stati al momento attuale per l'utilizzo nella fase di elaborazione dei risultati in un successivo *time step*. Questo compito viene eseguito durante la simulazione di modelli che definiscono stati. Si possono avere due tipi di stato in un modello Simulink: stati discreti e continui. Uno stato

continuo cambia continuamente. Uno stato discreto è un'approssimazione di un stato continuo in cui lo stato è aggiornato (ricalcolato) utilizzando intervalli finiti (periodici o aperiodici). Nel limite, come l'intervallo di tempo discreto dello stato tende a zero, uno stato discreto diventa equivalente ad uno stato continuo.

I blocchi definiscono implicitamente un modello a stati. In particolare, un blocco che ha bisogno di alcuni o tutti le sue precedenti uscite per calcolare le sue uscite attuali definisce implicitamente un insieme di stati che hanno bisogno di essere salvato tra i *time steps*. Tale blocco si dice che abbia stati.

Il numero totale di stati di un modello è la somma di tutti gli stati definiti da tutti i suoi blocchi. La determinazione del numero di stati in un diagramma richiede l'analisi del diagramma per determinare i tipi di blocchi li contengono e quindi aggregando il numero di stati definiti da ogni istanza di un tipo di blocco che definisce stati. Questo compito è svolto durante la fase di compilazione di una simulazione.

### **Parametri dei blocchi**

Le proprietà chiave di molti blocchi standard sono parametrizzate. Ad esempio, il valore della costante blocco *Simulink Constant* è un parametro. Ogni blocco parametrizzato ha una finestra di dialogo che consente di impostare i valori dei parametri. È possibile utilizzare espressioni MATLAB per specificare i valori dei parametri. Simulink valuta le espressioni prima di eseguire una simulazione. È possibile modificare i valori dei parametri nel corso di una simulazione. Questo permette di determinare interattivamente il valore più adatto per un parametro.

Un blocco parametrizzato rappresenta effettivamente una famiglia di blocchi simili. Ad esempio, quando si crea un modello, è possibile impostare il parametro del valore *Constant* di ogni istanza del blocco *Constant* separatamente in modo che ogni istanza si comporta in modo diverso. Perché permette a ogni blocco standard di rappresentare una famiglia di blocchi, la parametrizzazione del blocco aumenta notevolmente la potenza di modellazione delle librerie standard di Simulink.

### **Parametri Tunable**

Molti parametri del blocco sono *Tunable*. Un parametro *Tunable* è un parametro il cui valore può essere modificato senza ricompilazione del modello. Ad esempio, il parametro guadagno (gain) del blocco *Gain* è *Tunable*. È possibile modificare il blocco *Gain* mentre una simulazione è in esecuzione. Se un parametro non è *Tunable* e la simulazione è in esecuzione, il controllo della finestra di dialogo, che fissa il parametro è disattivato.

Aprire la finestra di dialogo di una di blocco con parametri *Tunable* provoca la messa in pausa di una simulazione in esecuzione. Anche se la simulazione è in pausa, è possibile modificare i valori dei parametri visualizzati sulla finestra di dialogo. Tuttavia, è necessario chiudere la finestra di dialogo per far sì che le modifiche abbiano effetto e permettere di continuare la simulazione.

Va sottolineato che i cambiamenti del parametro non si verificano immediatamente, ma rimangono in coda e sono applicati all'inizio della prossima *time step* durante l'esecuzione del modello.

È possibile utilizzare l'opzione parametri *Inline* sul *Pannello Ottimizzazione* della finestra di dialogo *Configurazione Parametri* per specificare che tutti i parametri del modello sono *non-Tunable*, ad eccezione di quelli specificati. Questo può accelerare la realizzazione di modelli di grandi dimensioni e consentire la generazione di codice più veloce dal modello.

### **Sample Times dei blocchi**

Il *Sample Time* di un blocco è un parametro che indica quando, durante la simulazione, il blocco produce risultati e, nel caso, aggiorna il suo stato interno. Lo stato interno include, ma non è limitato agli stati continui e discreti, che sono stati registrati.

Ogni blocco Simulink ha un *Sample Times* che definisce quando il blocco viene eseguito. La maggior parte dei blocchi consentono di specificare il *Sample Times* attraverso un parametro *SampleTime*. Le comuni scelte includono *Sample Times* discrete, continue, e ereditato.

Per blocchi discreti, il campione di tempo è un vettore  $[T_s, T_0]$ , dove  $T_s$  è l'intervallo di tempo o il periodo tra *Sample Times* consecutivi e  $T_0$  è l'offset iniziale dei *Sample Times*. Al contrario, i *Sample Times* per blocchi non-discreti sono rappresentati da coppie ordinate che utilizzano zero, un intero negativo, o infinito per rappresentare un determinato tipo di *Sample Time*. Ad esempio, blocchi continui hanno un valore nominale del *Sample Time*  $[0, 0]$  e sono utilizzati per modellare sistemi in cui gli stati cambiano continuamente. Invece si indica il tipo di *Sample Time* del blocco ereditato simbolicamente come  $[-1, 0]$  e Simulink poi determina il valore reale, basandosi sul contesto del blocco ereditato all'interno del modello.

### **Blocchi personalizzati**

È possibile creare librerie di blocchi personalizzati che possono poi essere utilizzati nei modelli. È possibile creare un blocco personalizzato sia graficamente che con la programmazione. Per creare un blocco personalizzato graficamente, si disegna uno schema a blocchi che rappresenta il comportamento del blocco, si avvolge questo schema in un *Sottosistema Simulink*, e si può fornire al blocco una finestra di dialogo dei parametri, usando la struttura maschera del blocco Simulink. Per creare un blocco di programmazione, si crea un M-file o una MEX-file che contiene le funzioni di sistema del blocco. Il file risultante viene chiamato una S-function. Quindi si associa la S-function con le istanze del blocco *Simulink S-function* nel modello. È possibile aggiungere una finestra di dialogo dei parametri al blocco S-function avvolgendolo in un sottosistema e aggiungendo tale finestra di dialogo dei parametri al blocco sottosistema.

### **Sistemi e sottosistemi**

Un diagramma a blocchi Simulink può essere composto da strati. Ogni strato è definito da un sottosistema. Un sottosistema è parte dell'intero schema a blocchi e idealmente non ha alcun impatto sul significato del diagramma a blocchi. I sottosistemi sono forniti principalmente per aiutare con gli aspetti organizzativi di un diagramma a blocchi. I sottosistemi non definiscono uno schema a blocchi separato.

Il software Simulink distingue tra due diversi tipi di sottosistemi: virtuali e non-virtuali. La principale differenza è che sottosistemi non-virtuali forniscono la capacità di controllo quando sono valutati i contenuti del sottosistema.

### **Segnali**

I segnali sono quantità variabili nel tempo rappresentate dalle linee che collegano i blocchi. È possibile specificare una vasta gamma di attributi del segnale, compreso il nome, il tipo di dati, il tipo numerico (reale o complesso), e la dimensionalità. Molti blocchi possono accettare segnali di uscita di qualsiasi tipo di dato numerico e di qualsiasi dimensione. Altri impongono restrizioni sugli attributi dei segnali che sono in grado di gestire.

È anche possibile specificare la modalità di campionamento del segnale.

### **Compilazione del modello**

La prima fase della simulazione si verifica quando si sceglie *Avvia* dal menu *Model Editor's Simulation*, con il modello del sistema aperto. Questo fa sì che il motore di Simulink richiami il compilatore del modello. Il compilatore del modello converte il modello in una forma eseguibile, un processo chiamato compilazione. In particolare, il compilatore

- Valuta le espressioni dei parametri dei blocchi del modello per determinare i loro valori.

- Determina gli attributi dei segnali, come il nome, il tipo di dati, il tipo numerico non espressamente specificati dal modello e verifica che ogni blocco può accettare i segnali collegati ai suoi ingressi.
- Eseguendo ottimizzazioni di riduzione di blocco.
- Riduce la gerarchia del modello virtuale sostituendo sottosistemi con i blocchi che essi contengono.
- Determina i sample times di tutti i blocchi del modello in cui non sono stati esplicitamente specificati.

### **Fase di Link**

In questa fase, il motore Simulink alloca memoria necessaria per le aree di lavoro (segnali, afferme, e parametri di run-time) per la l'esecuzione del diagramma a blocchi. Si assegna e inizializza memoria anche per strutture di dati che memorizzano di informazioni di run-time per ogni blocco. Per i blocchi costruiti, la principale struttura dati di run-time per un blocco è chiamato SimBlock. Essa memorizza i puntatori agli ingressi e ai buffer di uscita del blocco.

### **Fase Simulation Loop**

Una volta completata la fase di Link, la simulazione entra nella fase Simulation Loop. In questa fase, il motore di Simulink calcola successivamente gli stati e le uscite del sistema ad intervalli dal tempo di avvio della simulazione fino al tempo finale, utilizzando le informazioni fornite dal modello. I successivi punti del tempo in cui gli stati e le uscite sono calcolate sono chiamati *time steps*. La lunghezza di tempo tra gli steps è chiamato *step size*. Lo *step size* dipende dal tipo di risolutore (solver) utilizzato per il calcolo degli stati continui del sistema, il *sample time* fondamentale del sistema, e se gli stati continui del sistema hanno discontinuità.

La fase Simulation Loop ha due sottofasi: la fase *Loop Initialization* e la fase *Loop Iteration*. La fase *Loop Initialization* si verifica una sola volta, all'inizio del ciclo. La fase *Loop Iteration* si ripete una volta per time step dal tempo di inizio al tempo di fine della simulazione.

All'inizio della simulazione, il modello specifica e gli stati iniziali e le uscite del sistem. Ad ogni passo, sono calcolati nuovi valori per gli input, gli stati, e le uscite del sistema, e il modello viene aggiornato per riflettere i valori calcolati. Alla fine della simulazione, il modello riflette i valori finali degli input, dei Stati, e delle uscite del sistema.

### **Risolutore (Solver)**

Un sistema dinamico è simulato calcolando i suoi stati in successivi *time steps* in un determinato lasso di tempo, utilizzando le informazioni fornite dal modello. Il processo di elaborazione dei successivi stati di un sistema dal suo modello è noto come la soluzione del modello. Non esiste un unico metodo di risoluzione adatto a tutti i modelli dei sistemi. Di conseguenza sono disponibili una serie di programmi, conosciuti come risolutori (solver), ciascuno capace di fornire un particolare approccio alla soluzione di un modello. La finestra di dialogo *Configuration Parameters* consente di scegliere il solutore più adatto per il modello.

In Simulink i risolutori (solver) si dividono in due categorie fondamentali: a passo fisso (Fixed-Step) e a passo variabile (Variable-Step).

I solver a passo fisso risolvono il modello a intervalli di tempo regolari fra l'inizio e la fine della simulazione. Le dimensioni del intervallo è noto come *step size*. È possibile specificare lo *step size* o lasciare che il solver stesso lo scelga. In generale, riducendo lo *step size* aumenta la precisione dei risultati, ma si aumenta il tempo necessario per simulare il sistema.

I solver a passo variabile cambiano lo *step size* durante la simulazione, riducendolo per aumentare la precisione, quando gli stati del modello stanno cambiando rapidamente e aumentandolo al fine di evitare inutili passaggi quando gli stati del modello stanno cambiando lentamente. Il calcolo dello *step size* si aggiunge alla computazione globale ad ogni passo, ma può ridurre il numero totale di

passi e, di conseguenza, della simulazione, con l'obbligo di mantenere un determinato livello di precisione per i modelli con rapida evoluzione.

Simulink inoltre fornisce risolutori sia continui che discreti.

I risolutori continui usano integrazione numerica per calcolare gli stati del modello continuo al *time step* attuale sulla base dello stato al precedente *time step* e degli stati derivati. I solver continui si appoggiano sui singoli blocchi per calcolare i valori degli stati del modello discreto a ogni *time step*. I risolutori discreti esistono principalmente per risolvere puramente modelli discreti. Calcolano il successivo *time step* della simulazione per un modello e nient'altro. Nell'effettuare tali calcoli, si basano su ogni blocco del modello per aggiornare i suoi stati singoli discreti. Essi non calcolano stati continui.

## A.2 Real-Time Workshop

Real-Time Workshop genera ed esegue codice C standalone per lo sviluppo e il test di algoritmi modellati in Simulink. Il codice risultante può essere utilizzato per molte applicazioni in tempo reale. È possibile regolare e monitorare interattivamente il codice generato utilizzando i blocchi e le funzioni di analisi built-in di Simulink, oppure eseguire e interagire con il codice al di fuori dell'ambiente MATLAB e Simulink.

Real-Time Workshop è parte integrante dell'ambiente Simulink. Si può interagire con Real-Time Workshop usando l'interfaccia grafica *Simulink Model Explorer*, avendo così un unico ambiente (Simulink) per configurare le impostazioni per la generazione di codice. Dal *Simulink Model Explorer* è possibile:

- Generare codice per modelli o sottosistemi Simulink
- Selezionare un target Real-Time Workshop
- Configurare il target per la generazione di codice
- Gestire set di configurazione multipli

Il Model Advisor in Simulink inoltre controlla la configurazione del modello.

### Selezionare i targets

Real-Time Workshop utilizza target template file per tradurre i modelli Simulink in codice ANSI/ISO C. I target template specificano l'ambiente in cui il codice generato verrà eseguito. Si possono sviluppare custom target, o utilizzare configurazioni 'ready to-run' e target di terze parti supportate dal Real-Time Workshop. Questi includono i seguenti:

- Generic Real-Time Target - genera codice per il tuning interattivo dei parametri dei modelli, registra e visualizza in tempo reale i risultati della simulazione, e alloca dati staticamente (per un'efficace l'esecuzione in tempo reale)
- Generic Real-Time Malloc Target - usa allocazione dinamica della memoria nel codice generato, che consente di includere istanze multiple del modello o più modelli in un eseguibile
- S-Function Target - converte modelli in Simulink DLL S-function, che permette di condividere i modelli di simulazione, senza compromettere le proprietà intellettuali
- Rapid Simulation Target (RSim) - fornisce una piattaforma di test veloce, flessibile per eseguire studi di simulazione batch o Monte Carlo utilizzando risolutori a passo fisso o variabile, il che rende facile variare i parametri del modello e i dati del segnale di ingresso per ogni run e salvare i dati in un unico file di uscita.
- Tornado Target - genera il codice per l'esecuzione su VxWorks, un RTOS del Wind River Systems

Tutti i target supportano modelli single-tasking, multitasking, a tempo-continuo ibrido e a tempo discreto.

È possibile generare e distribuire codice C prodotto in sistemi embedded Real-Time, utilizzando i target Real-Time Workshop Embedded Coder.

Real-Time Workshop permette di controllare il modo in cui appaiono i dati del modello nel codice generato. Essa consente inoltre di gestire i dati attraverso:

- Dichiarazione dei tipi di dati utilizzando blocchi built-in dei tipi di dati (interi, in virgola mobile e fissa)
- Definire la memorizzazione per regolare e calibrare i parametri o le costanti
- Definire la memorizzazione per monitorare e accedere ai dati del segnale
- Riutilizzare la memorizzazione per ridurre al minimo i dati locali.

Real-Time Workshop genera codice a partire dai dati memorizzati nel diagramma o in un dizionario dei dati forniti dal Simulink Model Explorer. Questa capacità consente di ridistribuire il codice da un modello unico per target diversi, integrando diversi set di dati.

### **Real-Time Workshop Embedded Coder**

Real-Time Workshop Embedded Coder genera codice C da modelli Simulink e Stateflow con la stessa chiarezza ed efficienza del codice professionale scritto manualmente. Il codice generato è straordinariamente compatto e veloce, requisiti essenziali per sistemi incorporati, schede per la prototipazione rapida on-target, microprocessori utilizzati in produzioni di massa e simulatori in tempo reale. Real-Time Workshop Embedded Coder può essere utilizzato per specificare, impiegare e verificare software di qualità professionale.

### **A.3 Distribuzione ODESSE**

Tutti i modelli di ODESSE sono stati realizzati in Simulink. Come risolutore è stato preso l'*ode 3 (Bogacki-Shampine)* a passo fisso. Questo è il metodo di integrazione numerica di equazioni differenziali basato sulla formulazione di Bogacki-Shampine, una implementazione della formulazione esplicita di Runge-Kutta del terzo ordine. Il passo fisso è stato impostato a 3600 secondi che corrisponde ad 1 ora. Il periodo di simulazione è 1 anno (dal tempo di start di 0 secondi al tempo di end di 31.536.000 secondi). I modelli sono stati testati per diverse variabili di input. Tali variabili e i parametri dei modelli sono stati resi visibili esternamente dichiarandole *Simulin Global*. Nella scheda Real-Time Workshop è stato impostato *ert.tlc* come *System target file*, ossia Real-Time Workshop Embedded Coder. In tal modo è stato possibile creare il codice C++ del modello complessivo e impacchettarlo con i relativi file e librerie associati. A questo punto è stato creato un progetto in Microsoft® Visual Studio® e impostando le librerie necessarie è possibile modificare il codice in modo tale da poter leggere ingressi diversi (per ogni diversa simulazione) e ottenere tutte le uscite che si vuole. Queste sono così lette dall'interfaccia alla fine della simulazione per poter essere visualizzate o salvate. I file di integrazione tra interfaccia e codice sono MAT file, file di MATLAB che è possibile leggere sia dal linguaggio C++ che da Java tramite opportune librerie.

Una volta testati i risultati, che sono uguali a quelli ottenuti in ambiente Simulink, ma restando separati da questo, con l'eseguibile ottenuto è possibile distribuire la piattaforma.

A tale scopo sempre attraverso Visual Studio creando un progetto Wizard dal precedente, e inserendo tutti i file necessari, come le dll, l'interfaccia (i file Java), il database (file di SQLite) e tutte le figure e immagini, si ottiene il file di setup. Questo è un file che permette l'installazione guidata su pc di tutta la piattaforma, che così può essere utilizzata su qualsiasi calcolatore.

## Appendice B: Elenco Normative

- UNI EN 1745:2005  
Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare i valori termici di progetto
- UNI EN ISO 6946:2008  
Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo
- UNI 7357:1974 + A101:1983 + A83:1979 + A3:1989  
Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici.
- UNI 10349:1994  
Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.
- UNI 10351:1994  
Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.
- UNI 10355:1994  
Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.
- UNI 10375:1995  
Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti.
- UNI/TS 11300-1:2008  
Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
- UNI/TS 11300-2:2008  
Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria
- UNI EN ISO 13786:2008  
Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo
- UNI EN ISO 13788:2003  
Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo
- UNI EN ISO 13790:2008  
Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento
- UNI EN ISO 14683:2008  
Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento

- Raccomandazioni CTI 003/03  
Prestazioni energetiche degli edifici - Climatizzazione invernale e preparazione acqua calda per usi igienico-sanitari
- Dlgs 192/05  
Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia
- Dlgs 311/06  
Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia

## **Bibliografia**

Livio Mazzarella, Martina Pasini, 2008. Le necessità normative, il calcolo dinamico delle prestazioni del sistema edificio-impianti: la soluzione Open Source, AiCARR.

Fabio Scurpi, Cristina Carletti, 2008 Analisi e confronto di codici di calcolo esistenti per la valutazione energetica degli edifici, AiCARR.

ASHRAE HANDBOOK, 1989. FUNDAMENTALS, SI Edition.

ASHRAE HANDBOOK, 2001. FUNDAMENTALS, SI Edition.

Rapporto Cesi, 2005. Ricerca Di Sistema: Caratterizzazione sperimentale dell'impianto cogenerativo a microturbina situato al CESI; simulazione d'esercizio di un impianto analogo per utenze residenziali; valutazioni economiche.

Giuliano Cammarata, 2007. Fisica tecnica ambientale, McGraw-Hill.

Carlo Pizzetti, 1987. Condizionamento dell'aria e refrigerazione. Teoria e calcolo degli impianti, vol.1 e vol.2, Masson.

FI.N.CO – ENEA, 2004. Libro Bianco: Energia – Ambiente – Edificio, Milano , Il Sole 24 Ore.

Politecnico di Milano, 2005. Rockwool Italia Spa: Efficienza Energetica degli Edifici, Milano.

ENEA, Dicembre 2007. Dossier Ecobuilding e Distretti Energetici, Wokshop. Dall'Ecobuilding al distretto energetico.

Biagio Di Pietra, Francesca Margotta, 2007. Complesso residenziale popolare ATC Biella: intervento di riqualificazione energetica. Rapporto Tecnico ENEA, Dip. ENE TER.

M.Citterio B.DiPietra F.Margiotta, 2008. Il Recupero Energetico nella Edilizia Sociale: Potenzialità e opportunità – Il caso degli edifici ATC di Biella, CIRIAF – Perugia.

## **Stima Dati Climatici**

Ceravolo F. , Di Pietra B. , Pizzuti S. , Puglisi G, 2008. Neural Models for Ambient Temperature Modelling, IEEE .

Francesco Ceravolo, Matteo De Felice, and Stefano Pizzuti, 2008. Ambient Temperature Modelling through Traditional and Soft Computing Methods, Springer.

Francesco Ceravolo, Matteo De Felice, Stefano Pizzuti, 2009. Combining Back-Propagation and Genetic Algorithms to Train Neural Networks for Ambient Temperature Modelling in Italy, Springer.

V.A.Graham, K.G.T. Hollands, and T.E.Unny, 1987. Stochastic variation of hourly solar radiation over the day, *Advances in Solar Energy Technology: Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society*, Vol. 4, 3796-3800.

V.A.Graham, K.G.T. Hollands, and T.E.Unny, 1998. A time series model for  $K_T$  with application to global synthetic weather generation, *Solar Energy* 41(3), 215-226.

J.A. Duffie and W.A. Beckman, 1980. *Solar engineering of thermal processes*, Wiley, New York.

B.Y.H.Liu and R.C.Jordan, 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy* 4(1), 1-19.

M.Collares-Perreira, and A.Rabl, 1979. The average distribution of solar radiation-Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, *Solar Energy* 22(2), 155-164.

Khotanzad, A., Davis, M. H., Abaye, A., Maratukulam, D. J., 1996. An artificial neural network hourly temperature forecaster with applications in load forecasting. *Power Systems, IEEE Transactions on* 11 (2), 870--876.

Lu, T., Viljanen, M., Prediction of indoor temperature and relative humidity using neural network models: model comparison. *Neural Computing & Applications*.

Balestrino, A., Bini Verona, F., Santanche, M., 1994. Time series analysis by neural networks: Environmental temperature forecasting. *Automazione e Strumentazione* 42 (12), 81-87

Thomas, Bertil, Soleimani-Mohseni, Mohsen, January 2007. Artificial neural network models for indoor temperature prediction: investigations in two buildings. *Neural Computing & Applications* 16 (1), 81-89.

Erbs, D. G., Klein, S. A., Beckman, W. A., 1983. Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures. *Ashrae Journal*, 60--65.

Altandombayci, O., Golcu, M., April 2009. Daily means ambient temperature prediction using artificial neural network method: A case study of turkey. *Renewable Energy* 34 (4), 1158--1161.

Klein S.A., Beckman W.A., Mitchell J.W., Duffie J.A., Duffie N.A., Freeman T.L., Mitchell J.C., Braun J.E., Evans B.L., Kummer J.P., Urban R.E., Fiksel A., Thornton J.W., Blair N.J., Williams P.M., Bradley D.E., : TRNSYS, a Transient System Simulation Program. Solar Energy Lab, Univ. of Wisconsin-Madison (2000).

Jolly, W., Graham, J., Michaelis, A., Nemani, R., Running, S., July 2005. A flexible, integrated system for generating meteorological surfaces derived from point sources across multiple geographic scales. *Environmental Modelling & Software* 20 (7), 873--882.

Thornton, P., Running, S., White, M., March 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology* 190 (3-4), 214--251.

Hofierka, J., Parajka, J., Mitasova, H., Mitas, L., 2002. Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. *Transactions in GIS* 6 (2), 135--150.

Jeffrey, S., Carter, J., Moodie, K., Beswick, A., June 2001. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of australian climate data. *Environmental Modelling & Software* 16 (4), 309--330.

Mitas L. and Mitasova H.: Spatial interpolation. In: P. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire and D.W. Rhind, Editors, *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, Wiley, pp. 481--492, 1999.

Huld, T., Šúri, M., Dunlop, E., Micale, F., December 2006. Estimating average daytime and daily temperature profiles within europe. *Environmental Modelling & Software* 21 (12), 1650--1661.

G.V. Pariswad, R.K. Bhardwaj and V.K. Nema, Prediction of monthly-mean hourly relative humidity, ambient temperature, and wind velocity for India, *Renewable Energy* 13 (3) (1998), pp. 363--380.

Hunter, A. J., April 1981. A climatic model for the prediction of percentile statistics for ambient temperature. *Monthly Weather Review* 109 (4), 722--728.

### **Applicazioni delle ANN per Solar Energy**

Elminir, H. K., Areed, F. F., Elsayed, T. S., September 2005. Estimation of solar radiation components incident on helwan site using neural networks. *Solar Energy* 79 (3), 270--279.

Mubiru, J., October 2008. Predicting total solar irradiation values using artificial neural networks. *Renewable Energy* 33 (10), 2329--2332.

Lam, J., Wan, K., Yang, L., May 2008. Solar radiation modelling using anns for different climates in china. *Energy Conversion and Management* 49 (5), 1080--1090.

Jiang, Y., October 2008. Prediction of monthly mean daily diffuse solar radiation using artificial neural networks and comparison with other empirical models. *Energy Policy* 36 (10), 3833-3837.

T. Krishnaiah, S. Rao, K. Madhumurthy and K.S. Reddy, Neural network approach for modeling global solar radiation, *Journal of Applied Sciences Research* 3 (2007), pp. 1105--1111

Soares, J., October 2004. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of Sao paulo using a neural-network technique. *Applied Energy* 79 (2), 201-214.

Goovaerts, P., February 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228 (1-2), 113--129.

Mitra A.K., Sankar N. Forecasting Maximum Temperatures via Fuzzy Nearest Neighbour Model over Delhi. *Applied and Computational Mathematics*. 2007; 6 (2), 288--294

Sen, Z., 1998. Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration. *Solar Energy* 63, pp. 39--49

Sodoudi S., Estimation of temperature, precipitation and evaporation with Neuro-Fuzzy method. In workshop of statistical downscaling, Oslo (2005).

Tatli, H., Sen, Z., 1999. A new fuzzy modelling approach for predicting the maximum daily temperature from a time series. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* (23), 173--180.

F. Spinelli, A. Maccari, E. Cogliani, M. Milone, La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare, ENEA, *Energia e Innovazione*, 1/2008 (web: Solaritaly - Atlante italiano della radiazione solare, <http://www.solaritaly.enea.it>).

### **ANN bibliography**

Meireles, M. R. G., Almeida, P. E. M., Simoes, M. G., 2003. A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 50 (3), 585--601.

P.J. Werbos, *Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences* (3d ed.), Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge, MA (1974).

Parker, D.B., 1982. Learning logic. In: *Invention Report 581-64 (File 1)*, Office of Technology Licensing, Stanford University.

Rumelhart, D. E., McClelland J. L., 1986. *Parallel distributed processing*, vol. 1 and 2. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H., 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2 (5), 359--366.

Park, J., Sandberg, I. W., 1991. Universal approximation using radial-basis-function networks. *Neural Comput.* 3 (2), 246--257.

Haykin, S., July 1998. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd Edition. Prentice Hall.

Kecman, V., March 2001. *Learning and Soft Computing*. MIT Press.

Kosko B., 1992. *Neural networks and fuzzy systems*. Prentice-Hall.

Girosi, F., Jones, M., Poggio, T., 1995. Regularization theory and neural networks architectures. *Neural Computation* 7, 219--269.

### **SVM Bibliography**

Vapnik, V. N., 1995. *The nature of statistical learning theory*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA.

Cai, Y., February 2002. Prediction of protein structural classes by support vector machines. *Computers & Chemistry* 26 (3), 293--296.

Tay, F., August 2001. Application of support vector machines in financial time series forecasting. *Omega* 29 (4), 309--317.

Drucker, H., Chris, Kaufman, B. L., Smola, A., Vapnik, V., 1997. Support vector regression machines. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 9*. Vol. 9. pp. 155--161.

Gunn, S. R., May 1998. Support vector machines for classification and regression. Tech. rep., Faculty of Engineering, Science and Mathematics School of Electronics and Computer Science.

Negoita, M. G., Reusch, B., 2005. *Real World Applications of Computational Intelligence (Studies in Fuzziness and Soft Computing)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.

### **GA Bibliography**

Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MI: University of Michigan Press.

Schaffer, J. D., Whitley, D., Eshelman, L. J., 1992. Combinations of genetic algorithms and neural networks: a survey of the state of the art. *Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, 1992., COGANN-92. International Workshop on*, 1--37.

Goldberg, D. E., January 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Professional.

Chang, C., Lin, C., 2001. Libsvm: a library for support vector machines. Software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>