



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Ingegneria Industriale

---

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN: INGEGNERIA INDUSTRIALE  
INDIRIZZO: FISICA TECNICA  
CICLO XXV

## **Sistema di monitoraggio energetico di edifici**

**Direttore della Scuola:** Ch.mo Prof. Paolo Colombo  
**Coordinatore d'indirizzo:** Ch.mo Prof. Luisa Rossetto  
**Supervisore:** Ch.mo Prof. Roberto Zecchin

**Dottorando:** Michele Pasqualetto



## SOMMARIO

Il lavoro sviluppato nell'ambito del dottorato di ricerca ha l'obiettivo di progettare, sviluppare, realizzare e verificare un sistema innovativo di sensori, e relativi algoritmi di elaborazione dei dati, che permetta di effettuare una rilevazione e una valutazione precise dei principali parametri ambientali ed energetici negli edifici.

Il progetto è stato inserito all'interno di un progetto sovvenzionato dalla Regione Veneto nell'ambito del "Piano strategico per la ricerca scientifica, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione 2008-2010" denominato SIMEA (Sistema Integrato/distribuito di Monitoraggio Energetico ed Ambientale).

La rete di sensori ha lo scopo di produrre il profilo energetico/operativo dell'edificio per essere successivamente utilizzato:

- ai fini della certificazione, per elaborare degli audit energetici in modo da migliorare le condizioni operative e di comfort;
- per incentivare l'utilizzo ottimizzato delle risorse attraverso un controllo automatico intelligente;
- per ricavare informazioni utili alle procedure di manutenzione.

La teoria riguardante l'energetica degli edifici si basa sul sottile compromesso tra comfort e consumi e, infatti, tutte le normative sono volte a cercare di abbassare i consumi non compromettendo il comfort dell'ambiente interno dentro cui le persone vivono.

A questo scopo, nel lavoro di tesi sono state considerate, tra le altre, la norma UNI EN 15251:2007 che definisce quali sono le componenti per assicurare il comfort indoor e la UNI EN 15603:2008 che specifica le tipologie di certificazione energetica; ed è proprio a quest'ultima che si riferisce il sistema di sensori sviluppato.

La letteratura tecnica presenta numerosi studi volti a definire l'effettiva valutazione energetica di un edificio e se questa possa essere certificata con una metodologia basata su esecuzione di calcoli oppure su misure eseguite in loco. Si può concludere che i procedimenti non sono discriminanti ma complementari: i metodi di calcolo servono per una valutazione di tipo standard, implementata spesso da strumenti software, mentre i monitoraggi sono utilizzati per una valutazione reale dei consumi.

Il sistema di sensori sviluppato cerca di soddisfare l'esigenza di utilizzare una metodologia basata sullo sfruttamento dei monitoraggi per la valutazione *ad hoc* del

comportamento reale edificio-impianto ma supportato, per la valutazione del consumo energetico, da un software di calcolo validato a livello internazionale.

La parte hardware del sistema di monitoraggio è formata da una serie di sensori per la misura delle varie grandezze termoigrometriche ed è diviso in due reti che differiscono per tipologia e obiettivi: la struttura a rete fissa, cablata, e la struttura a rete mobile, wireless.

Lo sviluppo del progetto di dottorato ha permesso di utilizzare i monitoraggi eseguiti con il sistema di sensori installato, non solo per il calcolo dei consumi attuali ma per realizzare anche delle previsioni a breve termine, ovvero per il giorno successivo. In particolare le previsioni effettuate sono state eseguite in due modalità:

- stima dei consumi con impianto di climatizzazione acceso e temperatura di setpoint impostata;
- stima della temperatura in evoluzione libera con impianto spento.

La parte conclusiva del lavoro è stata dedicata alla validazione delle previsioni eseguite nonché all'utilizzo della rete di sensori per altri scopi che potessero ampliare le potenzialità della sistema di monitoraggio sviluppato.

## **ABSTRACT**

The project developed during the PhD period aims to design, develop, implement and verify an innovative system of sensors and algorithms of data processing, which makes it possible for an accurate survey and assessment of the main environmental and energy parameters in buildings.

The work has been included in the project SIMEA (Integrated/Distributed Energy Monitoring and Environmental), funded by the Region of Veneto in the "Strategic Plan for Scientific Research, Technological Development and Innovation 2008-2010".

The sensor system is designed to produce the energy/operating building profile to be used for:

- the purpose of certification of buildings;
- the process of energy audits to improve the working conditions and comfort;
- to promote the maximization of resources through an intelligent automatic control.

The theory concerning the energy efficiency of buildings is based on a compromise between comfort and consumption and, in fact, all the regulations are aimed to decrease(decrease) the power consumption without compromising the comfort of the internal environment in which people are living.

For this purpose, in the project of thesis have been considered, among others, UNI EN 15251:2007 which has the purpose to define which are the components to ensure the indoor comfort and UNI EN 15603:2008 which explains in detail the types of energy certifications. The sensor system developed is based on the latter regulation.

The technical literature presents several studies aimed at defining the effective energy assessment of the building and if it can be certified with a methodology based on performing calculations or measurements made in situ. It can be concluded that the procedures are not discriminating but complementary: methods of calculation are used for an assessment of the standard type, implemented by software tools, while the monitoring system are used for assessment of the real consumption.

The sensor system developed tries to satisfy the need to use a methodology based on monitoring the real behavior of building-plant but supported, for assessment of the energy consumption, by a calculation software validated at international level.

The hardware part of the monitoring system is formed by a series of sensors for the measurement of various thermohygrometric parameters and is divided into two networks that differ by type and objectives: the structure in the fixed network (wired) and the structure in the mobile network (wireless).

The development of the PhD project made it possible for monitoring with the system of sensors installed; this system permits not only the calculation of current consumption but also to define a short-term forecasts for the next day. In particular, the forecasts have been carried out in two modes:

- estimation of consumption with air conditioning on and the setpoint temperature;
- estimation of the temperature in free evolution with the conditioning system off.

The final part of the work was devoted to the validation of the predictions made and the use of the sensor network for other purposes that could expand the potential of the monitoring system developed.

## INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduzione .....</b>   | <b>1</b>  |
| <br>  |           |
| <b>Capitolo 1. Sistemi di valutazione e monitoraggio del comfort interno .....</b>    | <b>5</b>  |
| 1.1. Metodi di valutazioni del comfort .....  | 7         |
| 1.1.1. <i>Il benessere termoigrometrico</i> .....                                     | 9         |
| 1.1.2. <i>Il benessere acustico</i> .....   | 12        |
| 1.1.3. <i>Il benessere luminoso</i> .....   | 13        |
| 1.2. Questionari per la valutazione del comfort.....                                  | 13        |
| 1.2.1. <i>L'indagine del Center for the Built Environment</i> .....                   | 13        |
| 1.3. Sensori per il monitoraggio .....  | 18        |
| 1.3.1. <i>Tecnologia wired e wireless</i> .....                                       | 19        |
| 1.3.2. <i>Tipologie di reti wireless</i> .....  | 21        |
| 1.3.3. <i>Struttura delle WSN</i> .....   | 21        |
| 1.3.4. <i>Impiego delle reti wireless nel monitoraggio</i> .....                      | 22        |
| <br>  |           |
| <b>Capitolo 2. EPBD 2002/91/CE e certificazione energetica degli edifici.....</b>     | <b>25</b> |
| 2.1. Direttiva Europea 2002/91/CE .....   | 26        |
| 2.1.1. <i>Metodi di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici</i> ..... | 27        |
| 2.2. Asset rating.....  | 28        |
| 2.2.1. <i>Software di calcolo per la valutazione di tipo standard</i> .....           | 29        |
| 2.2.2. <i>Sviluppi dei software di calcolo</i> .....                                  | 34        |
| 2.2.3. <i>Difficoltà nella valutazione di tipo asset</i> .....                        | 35        |
| 2.3. Operational rating.....  | 36        |
| 2.3.1. <i>Metodologie di analisi</i> .....  | 37        |
| 2.4. Un caso studio .....   | 38        |
| 2.4.1. <i>Introduzione</i> .....  | 38        |
| 2.4.2. <i>Stato dell'arte</i> .....   | 38        |
| 2.4.3. <i>Metodi</i> .....  | 39        |
| 2.4.4. <i>Discussione</i> .....   | 49        |
| <br>  |           |
| <b>Capitolo 3. Metodi di previsione .....</b>   | <b>53</b> |
| 3.1. Caratteristiche generali.....  | 54        |
| 3.1.1. <i>Tipi di previsioni</i> .....  | 54        |
| 3.1.2. <i>Orizzonte temporale della previsione</i> .....                              | 55        |
| 3.2. Modelli deterministici .....   | 55        |
| 3.2.1. <i>Metodi qualitativi</i> .....  | 56        |
| 3.2.2. <i>Metodi quantitativi</i> .....   | 57        |
| 3.3. Modelli stocastici .....   | 60        |
| 3.4. Modelli neurali .....  | 61        |
| 3.4.1. <i>Logica Fuzzy</i> .....  | 62        |
| 3.5. Stato dell'arte .....  | 63        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Capitolo 4. Reti di sensori per il monitoraggio energetico e ambientale.....</b> | <b>67</b>  |
| 4.1. Reti di sensori installate .....   | 68         |
| 4.1.1. Sistema mobile .....   | 69         |
| 4.1.2. Il sistema fisso.....  | 70         |
| 4.1.3. Sensori installati .....   | 71         |
| 4.1.4. Descrizione delle reti realizzate.....                                       | 73         |
| 4.2. Ambienti monitorati.....   | 77         |
| 4.2.1. Installazione della rete fissa .....   | 77         |
| 4.2.2. Installazione della rete mobile.....   | 78         |
| 4.3. Interfacciamento della rete di monitoraggio con EnergyPlus .....               | 79         |
| 4.3.1. Input meteorologici.....   | 79         |
| 4.3.2. Input geometrici e impiantistici .....                                       | 80         |
| 4.3.3. Input monitoraggi .....  | 80         |
| 4.3.4. Architettura del programma di automazione .....                              | 81         |
| 4.4. Simulazioni predittive.....  | 84         |
| 4.4.1. Metodologia di previsione del carico .....                                   | 84         |
| 4.4.2. Modalità di previsioni effettuate .....                                      | 86         |
| <br>  |            |
| <b>Capitolo 5. Previsioni e potenzialità del sistema edificio-impianto .....</b>    | <b>87</b>  |
| 5.1. Verifica sperimentale della previsione del sistema edificio-impianto .....     | 87         |
| 5.1.1. Condizioni al contorno .....   | 88         |
| 5.1.2. Procedura di calcolo .....   | 88         |
| 5.1.3. Risultati previsionali.....  | 89         |
| 5.1.4. Verifica previsioni.....   | 90         |
| 5.1.5. Discussione .....  | 91         |
| 5.2. Potenzialità della rete di sensori .....                                       | 92         |
| 5.2.1. Audit energetico.....  | 93         |
| 5.2.2. Stato dell'arte degli impianti di climatizzazione .....                      | 95         |
| <br>  |            |
| <b>Capitolo 6. Conclusioni.....</b>   | <b>101</b> |
| <br>  |            |
| <b>Bibliografia .....</b>   | <b>103</b> |
| Articoli all'interno di rivista .....   | 103        |
| Articoli all'interno di convegni.....   | 106        |
| Libri e tesi .....  | 108        |
| Riferimenti normativi .....   | 109        |
| Sitografia.....   | 110        |
| <br>  |            |
| <b>Allegato A .....</b>   | <b>111</b> |
| <br>  |            |
| <b>Allegato B.....</b>  | <b>113</b> |



## Introduzione

Uno dei maggiori problemi a livello mondiale riguarda il consumo sproporzionato delle risorse energetiche che provoca, da una parte l'impovertimento e la diminuzione delle fonti energetiche per il futuro e dall'altra l'aumento degli inquinanti e dei fenomeni connessi.

Dal 1997, anno in cui è stato definito il protocollo di Kyoto, è iniziata una lenta consapevolezza del problema da parte dei paesi industrializzati e, la diminuzione dei consumi energetici che conseguentemente ha portato a ridurre le emissioni inquinanti, è proseguita negli anni coinvolgendo un po' alla volta tutti i settori economico-sociali.

Nel 2002 l'Unione Europea, con la direttiva EPBD 2002/91/CE, ha voluto mettere le basi per la limitazione dei consumi energetici nel campo degli edifici introducendo un certificato in grado di valutare le prestazioni dell'edificio.

Il progetto approfondito durante il periodo di dottorato ha il fine di sviluppare e testare un sistema di sensori innovativo per il monitoraggio e la valutazione dei principali parametri ambientali ed energetici negli edifici.

L'acronimo stesso del progetto cela una parte fondamentale del sistema: SIMEA, Sistema Integrato/distribuito di Monitoraggio Energetico ed Ambientale.

Il sistema è distribuito in quanto una rete di sensori è per sua natura un sistema distribuito sia a livello spaziale e sia a livello logico. Il vantaggio di distribuire l'intelligenza attraverso la rete (sfruttando le interazioni e le comunicazioni tra i sensori al fine di stimare e predire i parametri di interesse) permette di ottenere da un lato la riduzione dell'utilizzo delle risorse e dall'altro l'aumento della sua robustezza.

La rete risulta anche integrata poiché l'infrastruttura realizzata non è solo costituita da sensori atti a monitorare dei parametri ma è integrata appunto, ed integrabile, con altri sistemi esterni, e altre reti presenti nel testbed, in modo da massimizzare l'utilizzo del sistema nel suo complesso.

“Pervasive, not invasive information” è l'idea guida: il sistema risulta essere intimamente inserito nell'ambiente e allo stesso tempo l'interazione con l'ambiente deve risultare

trasparente all'utente sia nel raccogliere l'informazione di monitoraggio sia nel fornire la possibilità di azione mediante interfacce multimodali e personalizzate.

L'attività di ricerca nel suo complesso ha riguardato vari partner accademici e non.

La parte di energetica degli edifici è stata sviluppata all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Padova, con le seguenti attività:

- supporto nella scelta e nella posizione di installazione dei sensori;
- modellizzazione dell'edificio con il software di simulazione dinamica;
- redazione di un programma di automatizzazione finalizzato alla selezione ed elaborazione dei dati e l'avvio automatizzato del programma di simulazione.

Sono intervenuti altri partner esterni per lo sviluppo della parte hardware e dei protocolli di comunicazione tra i sensori mentre Ri.Cert. S.p.A., capofila del progetto, ha fornito l'edificio testbed in cui è stato installato il sistema.

Il presente elaborato di tesi presenta nel primo capitolo una parte teorica riguardante i sistemi di monitoraggio, gli indici di comfort e la differenza tra la tecnologia wired e wireless e, nello specifico, la definizione degli elementi che compongono la rete di sensori progettata.

Il secondo capitolo esamina la direttiva europea EPBD, in particolare prestando attenzione alle diverse tipologie di certificazione e fornendo un caso studio analizzato per avvalorare la differenza tra la metodologia di tipo "asset rating" e "operational rating".

Nel terzo capitolo è descritto lo stato dell'arte dei metodi di previsione per fornire le basi necessarie per capire i vari metodi e definire quello utile nell'analisi delle previsioni del progetto di tesi.

Il quarto capitolo definisce nel dettaglio tutte le azioni intraprese per il monitoraggio ambientale con l'utilizzo del sistema di sensori realizzato: dalla scelta degli ambienti analizzati, al layout del sistema, all'interfacciamento della rete con il software di simulazione dinamica e fino alle modalità di previsione dei carichi termici e delle temperature.

Il quinto capitolo riguarda l'esposizione dei risultati:

- la prima parte, fondamentale, riguardante la validazione della previsione dei consumi energetici, si definiranno le condizioni al contorno essenziali per il modello e la procedura di calcolo derivante dai metodi di previsione definiti nel terzo capitolo;

- la seconda parte in cui vengono descritti altri utilizzi del sistema di monitoraggio per aumentarne le potenzialità.

Infine nelle conclusioni sono presentate in sintesi le considerazioni che si possono trarre dal lavoro di tesi svolto, le potenzialità e le migliorie che si possono apportare al sistema di monitoraggio energetico realizzato.



## Capitolo 1. Sistemi di valutazione e monitoraggio del comfort interno

Uno dei temi focali in tutti i campi dell'ingegneria e della tecnica riguarda il tema dell'efficienza energetica, il cui scopo è quello di ridurre al minimo i consumi di ogni tipo di sistema che compia lavoro. Un sistema si può definire energeticamente efficiente quando utilizza l'energia primaria in modo razionale cioè con il minor spreco possibile. Questo significa non solo utilizzare meglio l'energia ma anche conservarla più adeguatamente riducendo le dispersioni.

Spesso risparmio energetico ed efficienza energetica vengono usati come sinonimi ma in realtà la differenza è sostanziale. Infatti se fare efficienza porta ad un risparmio energetico non è sempre vero il contrario perché, come indicato nel Libro Verde della Comunità Europea (2005): fare efficienza energetica significa “fare di più con meno”.

Per riuscire a definire se un sistema è efficiente o meno bisogna valutarlo e questo viene fatto attraverso due tipi di strumenti: l'uso di monitoraggi attraverso sistemi di misura per stimare il consumo dell'impianto in esame e il rispetto dei limiti imposti da normative atte a standardizzare lo studio.

Inizialmente definiamo tecnicamente il significato del termine *misurazione*. Per il VIM (1993) il termine misurazione (o più specificatamente measurement in inglese) sono “Insieme di operazioni che ha lo scopo di determinare un valore di una grandezza.” mentre per la UNI 4546:1984 sono “Insieme di operazioni materiali ed elaborative compiute mediante appositi dispositivi posti in interazione con il sistema misurato allo scopo di assegnare la misura di una grandezza assunta come parametro di tale sistema.”.

Una misurazione suppone una descrizione della grandezza compatibile con l'utilizzo previsto del risultato della misura, una procedura di misura e un sistema di misura tarato funzionante secondo la procedura di misura specificata, includente le condizioni di misura.

Un generico strumento (o sistema) di misura si può rappresentare mediante una configurazione generalizzata composta da tre stadi che costituiscono la "catena di misura" (Antonucci et al., 2012):

- I stadio: il sensore, o elemento sensibile, ha il compito di interagire direttamente con il misurando e trasformarlo in una grandezza fisica (segnale di misura) più idonea alle successive elaborazioni. Il segnale di misura può essere della stessa natura o, come di solito accade, di natura differente rispetto a quella del misurando; in tal caso più che di sensore si parlerà di trasduttore;
- II stadio: il convertitore, quella parte dello strumento atta a trasformare l'informazione proveniente dal sensore in una grandezza di più facile utilizzazione da parte dello sperimentatore, standardizza il segnale di uscita del sensore;
- III stadio: il visualizzatore, ovvero il dispositivo di lettura che può essere di tipo analogico o digitale, elabora la lettura finale.

Il processo di misurazione serve per determinare la grandezza di cui si vuole conoscere il valore numerico ed è la base per arrivare poi alla parte di audit, energetico nel nostro caso studio, in cui si deciderà se il sistema è valutato positivamente o meno, confrontando il valore monitorato con il limite da normativa e, in secondo luogo se si vuole intervenire per realizzare delle procedure per ridurre il consumo di energia.

La stesura di questo capitolo esamina lo stato dell'arte della teoria del comfort che sta alla base di qualsiasi lavoro nel campo dell'analisi energetica del clima indoor. La teoria del comfort affronta il problema dal punto di vista oggettivo attraverso l'uso di metodi numerici; il caso del CBE a Berkeley ha sviluppato un'altra tipologia di valutazione del comfort interno che considera invece le valutazioni soggettive dei soggetti all'interno degli ambienti oggetto dello studio.

Nella seconda parte del capitolo si confrontano le tecnologie con cui si può realizzare concretamente un sistema di monitoraggio, parte fondamentale della realizzazione del progetto di dottorato.

## **1.1. Metodi di valutazioni del comfort**

Come definito nell'introduzione, un sistema di monitoraggio deve essere personalizzato per il tipo di misurazione e il tipo di grandezze che deve monitorare. Quello qui sviluppato ha lo scopo, come già introdotto, di eseguire un monitoraggio di tipo energetico ed ambientale, come si evince dall'acronimo dato al progetto, SIMEA (Sistema Integrato/distribuito di Monitoraggio Energetico ed Ambientale).

Rispetto al tema dell'efficienza energetica, le motivazioni che spingono ad eseguire un monitoraggio della qualità ambientale non sempre sono apprezzate, né tanto meno comprese. Infatti, l'idea base per il comfort interno di un ambiente viene spesso ricondotto al solo raggiungimento di un'adeguata temperatura. Si legge però sulla direttiva europea EPBD (Energy Performance of Building Directive) che "... i requisiti minimi di rendimento energetico per gli edifici ... devono tener conto delle condizioni generali del clima degli ambienti interni, al fine di evitare eventuali effetti negativi..."

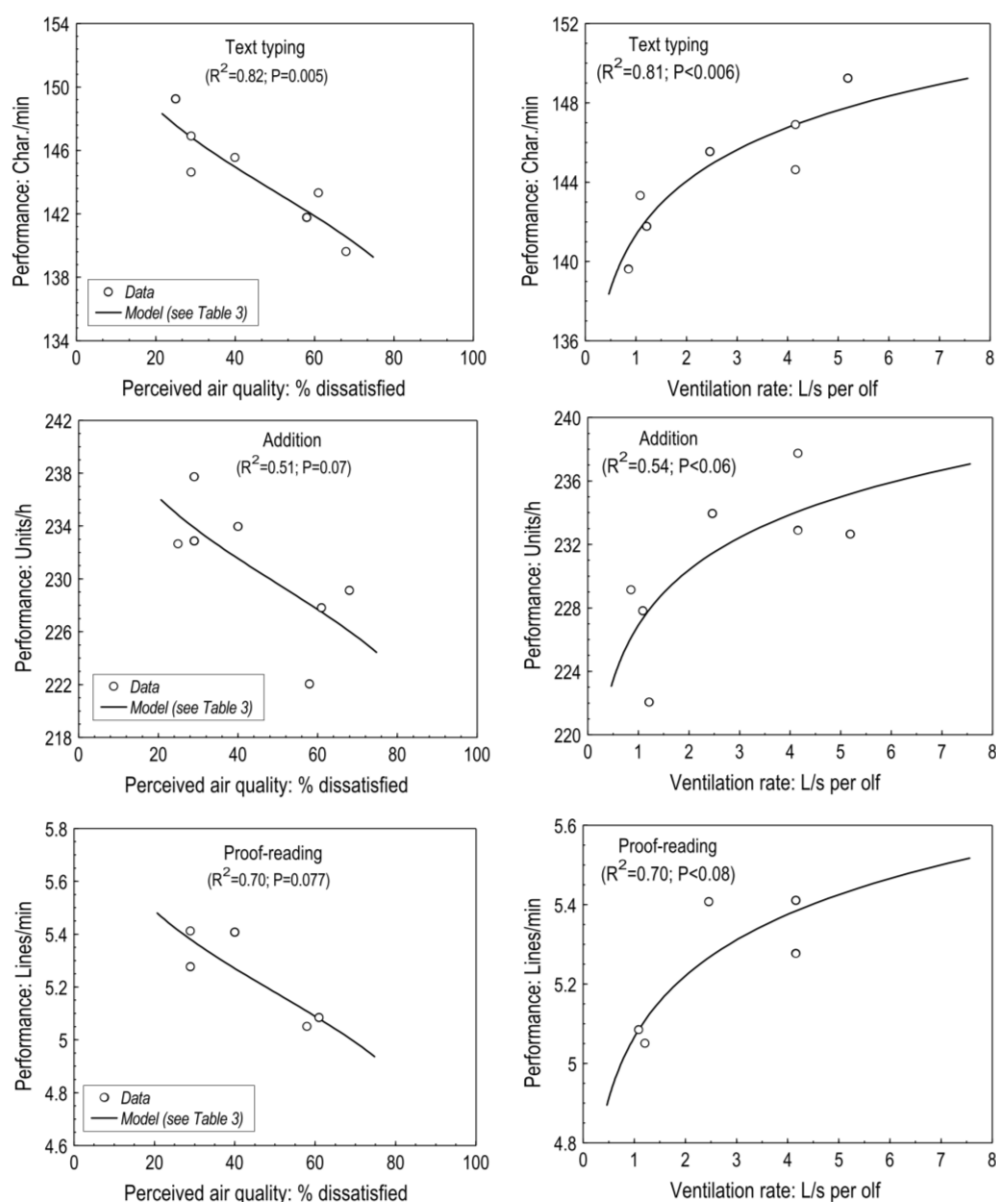
È su questa idea che successivamente è stata sviluppata anche la norma UNI EN 15251:2007 che prende in considerazione, oltre agli aspetti termoigrometrici, anche la qualità dell'aria, le condizioni di illuminamento e l'acustica, per assicurare per ognuna un livello soddisfacente di benessere per l'individuo che deve vivere all'interno dell'ambiente.

Le valutazioni legate al raggiungimento delle condizioni di benessere termoigrometrico sembrano in apparenza semplici ma richiedono invece conoscenze specifiche di normative tecniche che le regolamentano.

Uno dei temi più considerati è la qualità dell'aria (Indoor Air Quality, IAQ) in cui, di base, vi è il problema della presenza di sostanze inquinanti nell'aria all'interno di ambienti confinati. Maggiore è la loro concentrazione peggiore è la qualità dell'aria stessa e questo provoca anche una combinazione di disturbi associati nei luoghi di lavoro o di residenza definiti Sick Building Syndrome (SBS), o sindrome da edificio malato.

Molti studi hanno dimostrato che la percezione di un occupante di un ambiente dipende da una serie di parametri ambientali (Haghighat and Donnini, 1999; Fanger, 1988) e lo studio di Wong et al. (2008) ha permesso anche di ordinarli secondo il loro grado di importanza rispetto alla sensazione che percepisce l'uomo: comfort termico, qualità dell'aria interna, qualità acustica e comfort visivo.

Nel 2000 è stata effettuata una ricerca per determinare la relazione fra la qualità dell'aria e la produttività negli edifici (Wargocki et al., 2000). Sono state simulate e conteggiate tre tipologie di azioni (dette prestazioni): numero medio di caratteri digitati al minuto, numero medio di calcoli aritmetici per ogni ora e numero medio di linee che sono state correttamente rilette al minuto; il risultato sono i grafici di Figura 1.1.



**Figura 1.1 Percentuale di insoddisfatti rispetto alle performance simulate dovuti alla qualità dell'aria e al tasso di ventilazione (Wargocki et al., 2000).**

Analoghi risultati sono stati ottenuti da Wyon. Vi è una relazione lineare tra la percentuale di insoddisfatti della qualità dell'aria in ambienti chiusi (dal 20 al 70%) e il



decremento misurato in termini di prestazioni. Inoltre una scarsa qualità dell'aria negli ambienti chiusi riduce le prestazioni di lavoro dal 6-9% (Wyon, 2004).

Gli edifici affetti da SBS richiedono maggiori costi di gestione (Apte et al. 2006; Brown et al., 2010) e lo studio di Burge (2004) ha stimato il costo di un edificio mal gestito del governo in \$ 400.000 all'anno.

Installando dei sistemi di monitoraggio e messa in servizio di controllo si possono ridurre fino al 15-20% il fabbisogno energetico (Gigg e Slater, 2004); infatti lo studio di Mills et al. (2004) identifica proprio nella messa in servizio uno dei costi maggiori e possibile aumento dell'efficienza energetica negli edifici commerciali, con un risparmio di \$ 18 miliardi/anno negli Stati Uniti.

### **1.1.1. Il benessere termoigrometrico**

Il benessere termoigrometrico o thermal comfort è definito dall'American Society of Heating Ventilation and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) come quel particolare stato della mente che esprime soddisfazione con l'ambiente circostante.

Gli studi-esperimenti condotti da Fanger (1999) e Fang (2004) hanno messo in evidenza come in edifici residenziali con scadenti condizioni di comfort termoigrometrico il rischio di malattie polmonari, soprattutto nei bambini, è molto alto. Medesimi studi condotti invece in edifici adibiti a terziario dimostrano che, al di sotto di una certa soglia di parametri termoigrometrici, il grado di attenzione dei soggetti al loro interno e il conseguente rendimento si abbassano notevolmente.

Fanger è stato il precursore di questo ambito di studi e, come specificato nelle teorie che portano il suo nome, ha avvalorato la tesi che il benessere termoigrometrico in un edificio si raggiunge a seconda delle relazioni che si instaurano tra le variabili soggettive e le variabili ambientali (Fanger, 1972).

Dopo di lui altri hanno cominciato a studiare il comfort interno negli edifici mettendo in risalto altri aspetti che potessero essere influenzanti: psicologici, culturali, sociali dell'individuo, legati al sesso, all'età e allo stato di salute delle persone, parametri, questi che rientrano nella teoria conosciuta come "Adaptive Method", cioè metodo adattivo, avanzata da studiosi quali Brager (1998), de Dear (2002), Humphreys e Nicols (2002, 2010).

### 1.1.1.1. Modello di Fanger

#### Variabili soggettive

Un soggetto all'interno di un ambiente interagisce con lo stesso attraverso delle variabili definite soggettive e dipendenti dall'attività e dal vestiario della persona che sta all'interno dell'ambiente stesso.

L'attività che un individuo svolge, definita *attività metabolica*, si basa sul principio che l'energia chimica assunta dal soggetto con il cibo viene trasformata in energia termica. L'attività metabolica viene espressa in *met*, dove 1 met corrisponde a  $58,2 \text{ W/m}^2$  (i diversi valori corrispondenti alle attività fisiche sono descritti nella norma UNI EN ISO 7730:2006).

Il vestiario che il soggetto indossa, *clothing* in inglese, da cui deriva l'unità di misura, è una variabile che descrive il grado di isolamento che il soggetto, attraverso il vestiario, instaura con l'ambiente. Il grado di vestiario viene espresso il *clo*, dove 1 clo corrisponde a  $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$  (anche i valori dell'indice clo si possono ricavare dalla UNI EN ISO 7730:2006 e UNI EN ISO 9920:2009).

#### Variabili ambientali

Le condizioni climatiche esterne ed interne all'edificio dipendono da 4 variabili di seguito elencate. Tali condizioni, interagendo tra di loro, portano poi l'edificio ad un punto di equilibrio stabile che verrà valutato e indicato come benessere termoigrometrico :

- temperatura dell'aria: si misura in °C;
- umidità relativa dell'aria interna: indica il rapporto tra la quantità di vapore contenuto da una massa d'aria e la quantità massima che quella massa d'aria può contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione. Si misura in percentuale %;
- temperatura media radiante: si calcola come media delle temperature delle pareti interne all'ambiente, compresi soffitto e pavimento. È espressa in °C;
- velocità dell'aria: espressa in m/s.

#### Indici del benessere termoigrometrico di Fanger

Come risultato delle equazioni definite da Fanger (1970) in cui si inseriscono tutti i parametri definiti nei paragrafi precedenti, si ricavano dei valori che indicano il livello

comfort generale dell'ambiente che viene monitorato. Dalla norma UNI EN ISO 7730 se ne individuano due:

- il *Predicted Mean Vote* (PMV), definito anche Voto Medio Previsto: è un indice per stimare lo stato di benessere di una persona attraverso la funzione matematica

$$PMV = f(T_a, U_r, v, T_{mediarad}, clo, met)$$

che dà come risultato un valore numerico su una scala con range da -3 (indice di sensazione di troppo freddo) a +3 (indice di sensazione di troppo caldo) e dove lo zero rappresenta lo stato di benessere termico. È importante ricordare che il PMV rappresenta il voto di un individuo medio, ovvero la media dei voti espressi da un elevato numero di persone poste in certe condizioni sperimentali. Di conseguenza il raggiungimento del PMV pari a zero (corrispondente nella scala ad una condizione di benessere) non significa che l'intero gruppo ha raggiunto le condizioni di benessere;

- il *Percentage of Person Dissatisfied* (PPD), o Percentuale di Persone Insoddisfatte: in questo caso il valore del PPD esprime la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente riferite sempre a partire dal valore di PMV. Questo chiarisce meglio anche l'ultima affermazione del PMV in quanto, con condizione di benessere pari a zero, essendo un dato medio all'interno di un gruppo di individui, non tutti hanno una sensazione di comfort (essendo questa una sensazione puramente soggettiva) e il valore di PPD è uguale al 5% di insoddisfatti.

#### 1.1.1.2. Il Modello di Comfort Adattativo

Nel modello di comfort adattivo il soggetto occupante l'edificio non è più inteso come un soggetto passivo bensì come un agente attivo che interagisce con l'ambiente in cui si trova.

Il modello di comfort adattivo propone una correlazione (secondo la UNI EN 15251:2007) tra la temperatura di comfort per gli occupanti ( $T_{op}$ ) di un edificio e la temperatura dell'aria esterna ( $T_{em}$ ):

$$T_{op} = 0,33 \cdot T_{em} + 18,8 \cdot (T_{operativa\_ottimale\_giornaliera})$$

Il modello adattivo introduce quindi algoritmi di controllo e di risposta che permettono di migliorare il livello di comfort termico degli occupanti e di ridurre il consumo di energia.

### Tipologie di adattamento

Il modello di comfort adattivo si basa sulla convinzione che le persone all'interno di un edificio, in maniera conscia o inconsciamente, svolgono un ruolo attivo creando delle condizioni termiche che le soddisfano maggiormente e che, per raggiungerle più facilmente, diano vita ad un processo di adattamento, in modo da diminuire gradualmente le reazioni individuali agli stimoli ambientali.

Si distinguono tre tipi di adattamento:

- comportamentale: complesso dei cambiamenti che una persona mette in atto, in maniera conscia o no, per modificare i parametri che regolano il bilancio termico del corpo;
- fisiologico: l'esposizione prolungata a date condizioni riduce lo stress (negli ambienti moderati questo tipo di adattamento ha un'influenza trascurabile);
- psicologico: le esperienze pregresse e le aspettative modificano la percezione degli stimoli sensoriali e la reazione ad essi.

Tra i tre meccanismi di adattamento quello comportamentale fornisce alle persone un ruolo attivo nella conservazione del proprio comfort, proprio perché direttamente legato al bilancio termico del corpo umano.

Il modello adattivo, generalmente, definisce temperature di comfort maggiori e più flessibili rispetto al modello di Fanger.

### **1.1.2. Il benessere acustico**

Il benessere acustico esprime una condizione di benessere quando un soggetto non è disturbato nella sua attività da suoni presenti oppure non subisce danni all'apparato uditivo a causa dell'esposizione più o meno prolungata a forti rumori.

Il comfort uditivo è di particolare importanza in quanto l'esposizione al rumore non permette di svolgere le normali attività quotidiane, riducendone il rendimento, e può arrivare anche a provocare disturbi psicologici nei casi gravi.

Anche in acustica esistono un criterio di valutazione del comfort basato sul concetto di livello sonoro. In relazione al tipo di ambiente e all'attività svolta si definisce un livello sonoro di normale tollerabilità oltre la quale si perde la condizione di benessere.

### 1.1.3. Il benessere luminoso

La condizione di benessere luminoso interno ad un ambiente si ottiene quando una giusta quantità di luce viene percepita dall'occhio umano sulla superficie di lavoro in cui il soggetto sta svolgendo la sua attività (lavorativa o quotidiana), sia di giorno che di notte.

La differenza tra periodo diurno e notturno si riferisce all'uso diverso tra luce naturale e artificiale. Infatti durante il giorno è necessario che un'adeguata quantità di luce esterna possa entrare nell'ambiente dalle superfici finestrate presenti mentre durante la notte e nei momenti non soleggiati l'ambiente dovrà essere dotato di un'adeguata illuminazione artificiale.

## 1.2. Questionari per la valutazione del comfort

Nel capitolo precedente sono state definite le regole per determinare in maniera analitica, quindi oggettiva, il livello di comfort interno di un ambiente adottando il *modello di Fanger* e valutato attraverso gli indici PMV e PPD.

Come si è riscontrato, però, tale metodologia è stata superata dal modello di *comfort adattativo* in cui, oltre alle caratteristiche termoigrometriche di un ambiente bisogna considerare anche altre caratteristiche dipendenti dal soggetto che utilizza l'ambiente, arrivando a determinare 3 tipi di comfort: comportamentale, fisiologico e psicologico.

Ed è su questa metodologia che si basa l'uso di questionari per la valutazione in quanto si è consapevoli che la soggettività dell'individuo è preponderante rispetto all'oggettività dello stato fisico in cui si trova (questo è infatti supportato dal valore di PPD del 5% corrispondente a  $PMV=0$ ).

Lo studio allora si basa sull'ipotesi di sviluppare dei questionari adatti allo scopo, farli compilare ad un numero cospicuo di individui e, attraverso dei metodi statistici, riuscire a capire se tali individui si sentono o meno in una condizione di benessere nell'ambiente in cui si trovano.

### 1.2.1. L'indagine del Center for the Built Environment

Il Center for the Built Environment (CBE), Università della California a Berkeley, ha realizzato e impiegato in circa 320 edifici (in Canada, Stati Uniti e Finlandia), con l'aiuto di 47.000 persone, un questionario che affronta i seguenti temi: soddisfazione generale, distribuzione degli spazi all'interno dell'ufficio o dell'abitazione, comfort termico, qualità

dell'aria, illuminazione, qualità acustica, pulizia e manutenzione e SBS (sindrome dell'edificio malato) (Peretti et al. 2010).

La principale tecnica adottata per la creazione delle domande è definita “concurrent think aloud”; ai partecipanti coinvolti nel progetto è stato chiesto di mettere per iscritto commenti, pensieri e suggerimenti che venivano loro in mente al seguito della lettura, dell'interpretazione e della risposta delle domande.

L'esperienza ha evidenziato un intervallo di partecipazione fra il 27 e l'88%, con una maggioranza di risposta variabile fra il 45 e il 65%. Inoltre si è osservato che l'adesione risulta maggiore se il messaggio di presentazione viene inviato direttamente da una persona conosciuta, scelta dagli organizzatori dell'indagine (Huizenga et al., 2002).

Le potenzialità del database, creato con tutte le risposte inserite, sono molteplici. Ad esempio la possibilità di valutare in quale misura gli edifici raggiungono gli scopi di qualità ambientale per i quali sono stati progettati. Inoltre, utilizzando i dati di edifici simili si possono creare relazioni fra caratteristiche specifiche. Il confronto ha la finalità di evidenziare il tasso di persone soddisfatte per una specifica tematica.

Gli edifici sottoposti ad indagine possono avere diverse destinazioni d'uso, come ad esempio uffici, laboratori, banche, ospedali o carceri.

Il questionario realizzato può essere anche usato per la valutazione dell'edificio pre/post-intervento (sia con edificio nuovo che con edificio ristrutturato) da parte degli utenti: la prima indagine avviene mentre gli occupanti si trovano nella vecchia costruzione (o prima del rinnovo) e la seconda dopo sei mesi dal passaggio nel nuovo spazio.

### 1.2.1.1. Questionario e misure fisiche

Una possibilità sviluppata è stata l'uso del questionario associato alle misure con strumentazioni tecniche. Questo sistema permette, incrociando i monitoraggi eseguiti, di valutare in maniera migliore il livello di benessere interno.

A supporto di questo, nel 2004 è stata svolta una ricerca per comprendere come l'uso di finestre apribili negli uffici influenzava il comfort termico dei lavoratori (Zagreus et al. 2004). Dettagliate misure fisiche sono state raccolte per ogni postazione di lavoro utilizzando uno strumento di monitoraggio denominato “Weather Station Device”, progettato e creato dallo stesso CBE. La strumentazione, composta da una serie di sensori per l'acquisizione di dati sulla temperatura di bulbo secco, velocità dell'aria e temperatura

radiante è stata posizionata sulla scrivania degli intervistati, in quanto punto indicato per il monitoraggio delle caratteristiche indoor.

L'indagine ha evidenziato che maggiore è il controllo personalizzato e maggiore sarà il grado di soddisfazione degli utenti sulla qualità indoor degli ambienti.

#### 1.2.1.2. Il questionario del CBE

Dal 1996 il Center for the Built Environment, Università della California, ha sviluppato un questionario compilabile on-line con lo scopo di diagnosticare le problematiche degli edifici, di stabilirne le tecnologie di costruzione e di raccogliere dati sulla loro qualità.

Il test è costituito da una maggioranza di domande chiuse, nelle quali il gradimento o l'insoddisfazione viene espressa in una scala da 1 a 7 punti di facile intuizione grazie all'uso di simboli e colori (Figura 1.2).



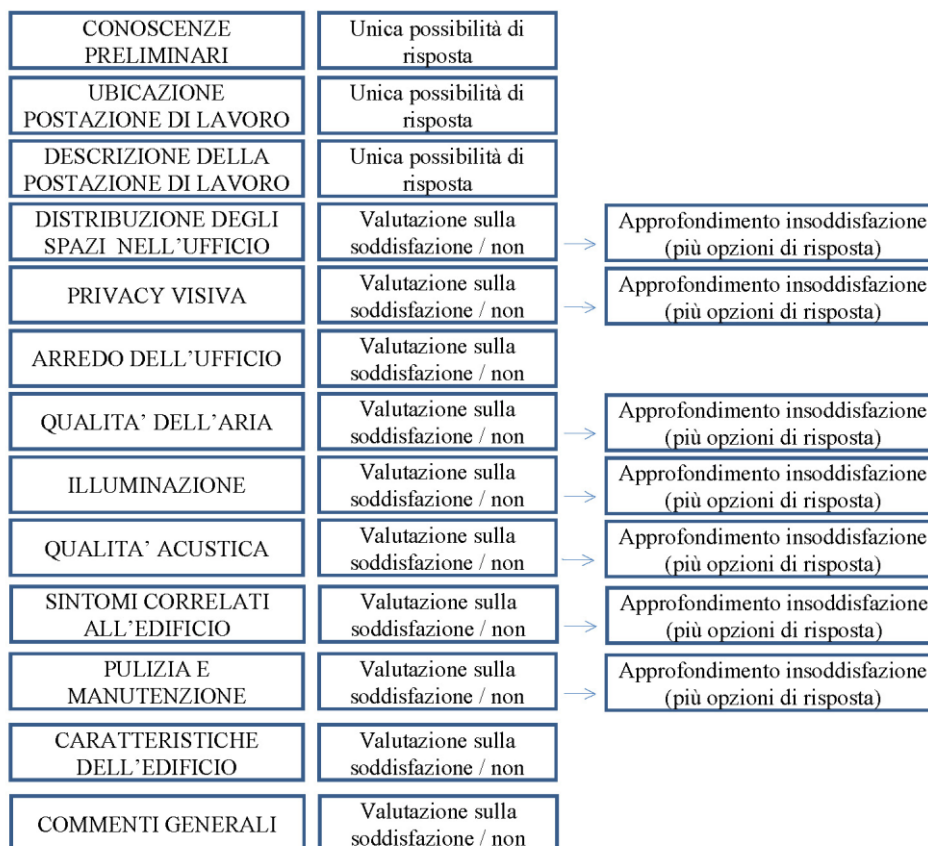
**Figura 1.2 Esempio di domande del questionario nella parte riguardante il comfort termico.**

Il numero di domande varia in funzione delle risposte che vengono date: l'espressione di un'insoddisfazione da parte dell'occupante viene infatti indagata facendo ulteriori domande, permettendo di aggiungere suggerimenti e commenti personali. Grazie a questa caratteristica la compilazione richiede dai 5 ai 15 minuti (Huizenga et al., 2003).

In Figura 1.3 viene illustrato la struttura del questionario sviluppato.

La prima parte del questionario riguarda le conoscenze preliminari, ovvero le caratteristiche del tipo di lavoro e dell'intervistato (età, sesso) mentre le successive esaminano la postazione di lavoro e la disposizione degli spazi dell'ufficio (Tabella 1.1 e Tabella 1.2) per passare infine alla parte di questionario in cui si considera la percezione delle caratteristiche dell'ambiente (Tabella 1.3 e Tabella 1.4).

Le prime domande approfondiscono le soddisfazioni/insoddisfazioni relative alla tematica affrontata, mentre l'ultima parte richiede un'auto valutazione delle proprie capacità lavorative. Alla fine di ogni tematica c'è la possibilità di aggiungere commenti personali.



**Figura 1.3 Tematiche e struttura del questionario.**

**Tabella 1.1 Distribuzione degli spazi all'interno dell'ufficio.**

| Tematica                            |   |
|-------------------------------------|---|
| Soddisfazione                       | Quanto è soddisfatto della quantità di spazio disponibile per svolgere le sue attività e per tenere il materiale di lavoro?<br>Quanto è soddisfatto del livello di privacy visiva?<br>Quanto è soddisfatto della facilità di interazione con i suoi colleghi? |
| Auto-valutazione della produttività | Nel complesso, la disposizione degli spazi nel suo ufficio migliora o peggiora la capacità di svolgere il suo lavoro?   |

**Tabella 1.2 Arredo dell'ufficio.**

| Tematica                            |  |
|-------------------------------------|--|
| Soddisfazione                       | Quanto è soddisfatto della possibilità di cambiare l'arredo in funzione dei suoi bisogni?<br>Quanto è soddisfatto del colore e della tipologia di pavimentazione e delle finiture delle superfici? |
| Auto-valutazione della produttività | L'arredo del suo ufficio migliora o peggiora la sua capacità di svolgere il suo lavoro?  |



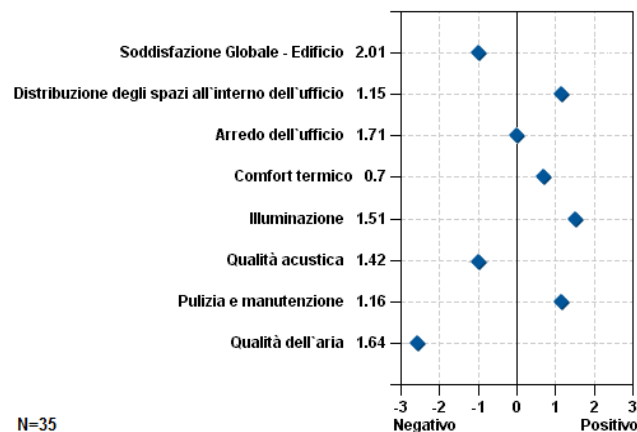
**Tabella 1.3. Comfort termico.**

| Tematica                            |   |
|-------------------------------------|---|
| Tipologia sistemi                   | Quale dei seguenti sistemi controlla o regola personalmente nella sua workstation?  |
| Soddisfazione                       | Quanto è soddisfatto della temperatura nella sua postazione di lavoro?  |
| Auto-valutazione della produttività | Nel complesso, il comfort termico nella sua postazione di lavoro migliora o peggiora la sua capacità di svolgere il suo lavoro? |

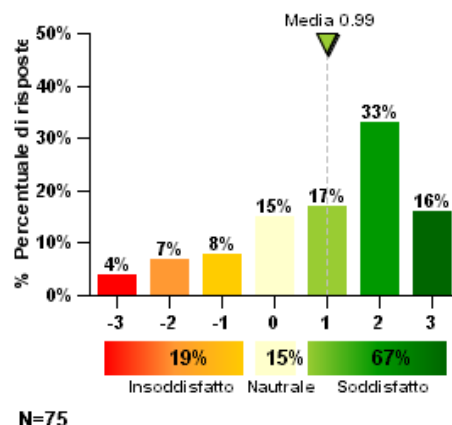
**Tabella 1.4. Qualità dell'aria, della luce e acustica.**

| Tematica                            |   |
|-------------------------------------|---|
| Soddisfazione                       | Quanto è soddisfatto della qualità dell'aria nella sua postazione di lavoro (aria sa di chiuso/stagnante, sensazione di freschezza e pulizia, odori)?   |
| Auto-valutazione della produttività | Nel complesso, la qualità dell'aria migliora o peggiora la sua capacità di svolgere il suo lavoro?  |
| Soddisfazione                       | Quanto è soddisfatto della quantità di luce nella sua postazione di lavoro?<br>Quanto è soddisfatto con il comfort visivo (ad es., abbagliamento, riflessi, contrasto)?   |
| Auto-valutazione della produttività | Nel complesso, Il sistema d'illuminazione presente migliora o peggiora la sua capacità di svolgere il suo lavoro?   |
| Soddisfazione                       | Quanto è soddisfatto del livello di rumore nella sua postazione di lavoro?<br>Quanto è soddisfatto della privacy acustica della sua postazione di lavoro (possibilità di fare delle conversazioni senza che i suoi vicini possano udire e viceversa)? |
| Auto-valutazione della produttività | Nel complesso, la qualità acustica presente nella sua postazione di lavoro migliora o peggiora la sua capacità di svolgere il suo lavoro?   |

Il report conclusivo valuta, con un punteggio che va da -3 a +3 per ogni tematica, il livello di comfort indoor (Figura 1.4). Viene inoltre calcolata la percentuale di soddisfatti e non, in funzione del numero di persone che hanno preso parte all'analisi (Figura 1.5). Ai diagrammi vengono infine associati i commenti degli intervistati.



**Figura 1.4 Valutazione del punteggio diviso per ogni tematica affrontata.**



**Figura 1.5** Grafico rappresentante la soddisfazione dei soggetti nell'indagine eseguita.

Dai risultati del CBE consultabili on-line, è possibile estrapolare i dati relativi alle tematiche che si vogliono indagare: per esempio per tipologia di argomento, come qualità dell'aria interna o pulizia degli ambienti, oppure per zona di lavoro, ad esempio, gruppi di persone che lavorano allo stesso piano oppure che svolgono determinate mansioni di lavoro. Selezionando un gruppo di risposte definito da criteri prestabiliti è possibile individuare le cause di specifiche problematiche.

### 1.3. Sensori per il monitoraggio

Per monitorare le grandezze fisiche che rientrano tra quelle fondamentali per la valutazione del comfort termico interno si deve ricorrere a *sensori*: trasduttori in diretta interazione con il sistema misurato (UNI 4546:1984). Il principio fisico su cui si basa il sensore è la trasformazione della grandezza in ingresso in un segnale di altra natura (nel caso specifico di natura elettrica).

I sensori sono classificati in base:

- alla tecnologia utilizzata (ottico, piezoelettrico...);
- alla funzione svolta e alla grandezza misurata (temperatura, spostamento, peso...)
- al loro comportamento energetico:
  - o sensori attivi: convertono direttamente l'energia in ingresso in quella in uscita senza l'uso di energia esterna;
  - o sensori passivi: al contrario dei precedenti hanno bisogno dell'alimentazione esterna;
- al tipo di uscita: sensori ad uscita continua o uscita logica.

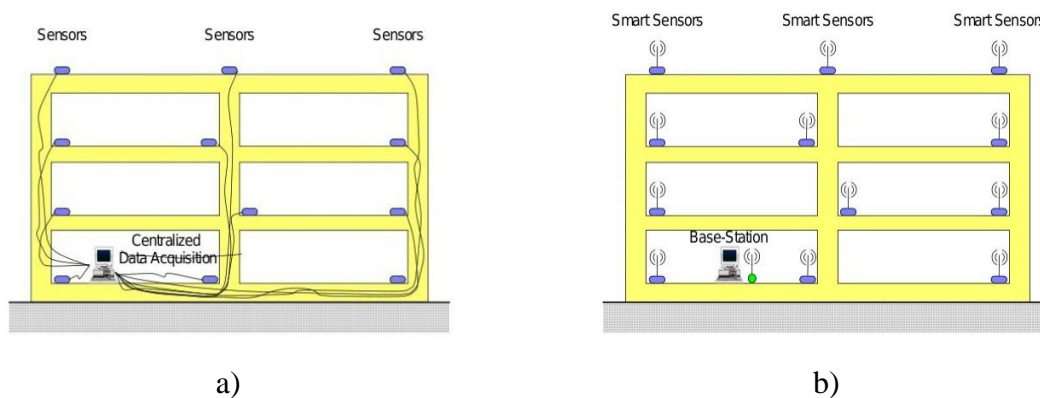
Mentre i parametri fondamentali per la scelta dei sensori in funzione del tipo di uso che deve essere eseguito sono: accuratezza, precisione, linearità, risoluzione, tempo di risposta, stabilità, affidabilità, fattori ambientali, costo, dimensione, peso e molti altri.

Una volta decisi i sensori da utilizzare bisogna definire il tipo di tecnologia di scambio dei dati: wired o wireless. Sempre di più in questi anni l'elettronica ha fatto passi da gigante per rimpicciolire i componenti, farli consumare meno energia e quindi rendere possibile tecnologie che prima erano irrealizzabili.

Nel nostro caso si è voluto sviluppare entrambe le tecnologie wired e wireless, avendo entrambe dei vantaggi e degli svantaggi che le rendono appetibili per il mercato.

### 1.3.1. Tecnologia wired e wireless

L'enorme aumento nella vita di tutti i giorni di tutti i dispositivi elettronici senza fili come computer portatili, cellulari e adesso smartphone sta dando vita ad una vera e propria "generazione wireless" e tutto questo per avere sempre a portata di mano strumenti che ci permettono di semplificarci la vita.



**Figura 1.6** Rappresentazione grafica di: a) una rete wired e b) una rete wireless.

Le reti cablate, o wired, costituite da cavi (Figura 1.6.a.), fino a pochi anni fa erano la maggior parte perché i vantaggi di tale tecnologia sono evidenti:

alimentazione illimitata, dove può arrivare un cavo per distribuire un segnale può arrivare anche un cavo di alimentazione;

- livelli buoni di sicurezza, in quanto per prelevare dati dalla rete deve esserci il fisico accesso della stessa;
- elevate prestazioni, la quantità di dati scambiati via cavo è maggiore rispetto alla tecnologia wireless.

Di contro però le limitazioni sono:

- difficoltà di realizzazione della rete in condizioni limitative;
- difficoltà nell'aggiungere un nuovo sensore in una rete già cablata totalmente.

La tecnologia wireless (Figura 1.6.b.), grazie all'assenza del cavo per lo scambio dei dati, ha permesso l'utilizzo delle reti in maniera fisicamente più flessibile, permette vantaggi di mobilità e flessibilità, nonché costi inferiori di realizzazione per l'assenza del cablaggio.

Gli svantaggi però risultano essere, al contrario delle reti wired: l'inferiore capacità di trasmissione (che limita anche il numero massimo di utenti che possono accedere contemporaneamente alla rete), la minore sicurezza della rete, la possibilità di mezzi che interferiscono con la rete (vedi onde elettromagnetiche in genere od ostacoli anche fisici) e, non da meno, il consumo degli apparati che deve essere minimo.

**Tabella 1.5** Caratteristiche principali tra la tecnologia wired e wireless (Beltrame, 2007).

| Wired | Caratteristica | Wireless |
|-------|----------------|----------|
| ↓     | Costo          | ↑        |
| ↑     | Consumi        | ↓        |
| ↑     | Affidabilità   | ↓        |
| ↓     | Mobilità       | ↑        |
| ↓     | Flessibilità   | ↑        |
| ↑     | Sicurezza      | ↓        |

**Tabella 1.6** Tipologie e caratteristiche delle reti wireless.

| Rete wireless              | WBAN      | WPAN              | WLAN       | WMAN         |
|----------------------------|-----------|-------------------|------------|--------------|
| Raggio di azione           | 1 m       | 10 m              | 100 m      | 10 km        |
| Standard IEEE <sup>1</sup> | 802.15    | 802.15            | 802.11     | 802.16       |
| Esempio di standard        | Bluetooth | Bluetooth, Zigbee | a, b, g, n | WiMax, WiBro |

In Tabella 1.5 si riassumono le caratteristiche principali dei sistemi wired e wireless; caratteristiche che corrispondono a differenze sostanziali che però possono essere più o meno marcate in base alla complessità progettuale, al costo di realizzazione e allo sviluppo futuro.

Le reti wireless di sensori, o Wireless Sensor Network (WSN) (Estrinet al., 2002), possono essere considerate come l'ultima fase del processo di miniaturizzazione ma il

<sup>1</sup> IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineers. Si occupa di definire e pubblicare standard nei campi dell'elettrotecnica, elettronica, informatica e biomedica.

rimpicciolimento degli elementi che costituiscono la rete wireless rappresentano solo la parte hardware. Alla base del sistema di sensori, che ne ha decretato lo sviluppo così massiccio, c'è sicuramente lo sviluppo dei protocolli e dei modi di telecomunicazione wireless (Tabella 1.6) che hanno consentito di creare architetture di comunicazione a costi contenuti e che sono in grado di raggiungere luoghi impervi e slegare il concetto di terminale da quello di posizione fisica.

### **1.3.2. Tipologie di reti wireless**

La classificazione delle reti di tipo wireless può essere fatta in base all'aria coperta dal segnale trasmesso dai dispositivi (Landi, 2004).

Le reti più piccole, definite Wireless Body Area Network (WBAN), sono reti composte da sensori che possono essere "installate" sul corpo umano (vedi gli auricolari per cellulari) e sono semplificate per permettere l'inserimento e la rimozione del dispositivo (con procedure di auto-configurazione) anche dagli utenti meno esperti.

Le Wireless Personal Area Network (WPAN) hanno un raggio di azione di circa 10 m con lo scopo di permettere la condivisione dei dati su dispositivi fisicamente vicini tra loro.

Con un raggio di azione maggiore ci sono le Wireless Local Area Network (WLAN) che riescono a connettere dispositivi anche a centinaia di metri di distanza e risultano utili per interconnettere dispositivi in grandi ambienti chiusi o tra edifici adiacenti.

Le Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) con raggi di azione dell'ordine delle decine di chilometri forniscono un accesso alla banda larga ad estese aree residenziali.

### **1.3.3. Struttura delle WSN**

Le tecnologie con cui si può realizzare una rete di sensori wireless possono essere di tre tipi: stella (star), mesh e albero (tree).

Come si nota dalla Figura 1.7 le strutture vengono differenziate in base alla collocazione dei dispositivi e dai collegamenti fisici e logici che li interconnettono.

Nella rete a *stella* un unico nodo coordinatore comunica direttamente con tutti gli altri attraverso un solo link e per questo motivo i protocolli usati sono di facile implementazione. A causa del carico di lavoro svolto dal coordinatore (tutti i messaggi devono passare per il centro stella), il suo consumo elevato di energia obbliga a collegarlo alla rete elettrica mentre i nodi possono utilizzare le batterie.

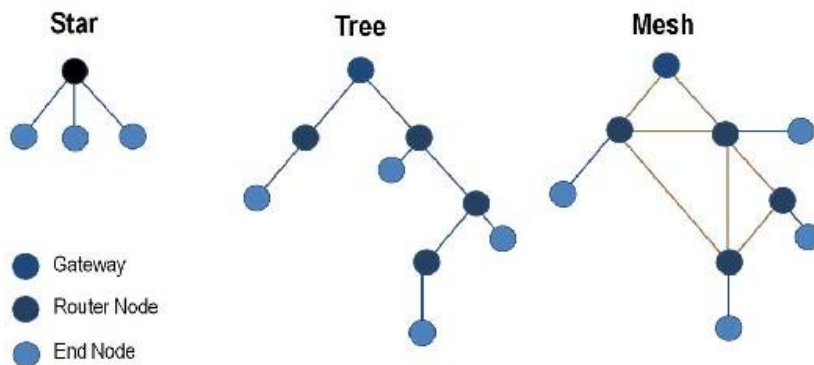


Figura 1.7 Tipologie di strutture di una rete wireless (<http://www.ni.com>).

Nella struttura a *mesh* tutti i nodi possono essere interconnessi tra di loro anche attraverso più link. Il coordinatore può trovarsi all'esterno della struttura e collegato con un nodo che farà da controllore mentre se non è presente il controllore tutti i nodi hanno funzione di coordinamento e hanno priorità paritetica. Un vantaggio rispetto alla struttura di tipo star sono i percorsi ridondanti che aumentano affidabilità e robustezza anche se richiedono di utilizzare algoritmi più complessi e definizione delle regole per lo scambio dei dati tra i vari nodi.

La struttura ad *albero* combina la struttura a stella e quella a mesh. La rete è composta da più nodi che ricevono le informazioni per poi comunicarle al nodo di livello superiore risalendo l'albero e arrivano alla radice (sink) che fa da punto di raccolta dati e coordinatore della rete (ogni gruppo di sensori è definito *cluster*). I vantaggi di questa struttura, rispetto alla mesh sono di diminuire i percorsi di comunicazione e di conseguenza di avere sistemi di gestione meno complessi, rispetto alla tipologia a stella è la possibilità di creare reti di grandi estensioni.

#### 1.3.4. Impiego delle reti wireless nel monitoraggio

Le reti di sensori WSN possono essere utilizzate in diversi settori (Crepaldi, 2006) in quanto, come definito precedentemente, i monitoraggi sono alla base di qualsiasi processo di tipo tecnologico in cui si voglia venire a conoscenza delle grandezze in gioco:

- monitoraggio ambientale: le applicazioni possono essere diverse visto il campo molto vasto, per esempio monitoraggio di inquinanti (Menzel et al., 2008) oppure studio di eventi naturali come incendi o terremoti;

- monitoraggio di strutture: le reti installate nelle strutture valutano lo stato di mantenimento di edifici, ponti e strutture in genere sottoposte a sollecitazioni esterne;
- controllo del traffico veicolare: i sensori in questo campo sono utilizzati per il controllo del numero di automobili, il rilevamento della velocità o l'individuazione di eventuali blocchi in situazioni anomale;
- applicazioni personali: sono definiti tutti gli usi di sistemi domotici all'interno delle abitazioni che permettono all'utente di gestire con maggiore facilità le apparecchiature elettroniche;
- sistemi di sorveglianza: sono reti utilizzate per la gestione della sorveglianza di edifici, luoghi a rischio o qualsiasi ambiente che debba essere controllato a distanza.

Healy (2005) riconosce nel suo articolo l'impiego sempre maggiore delle reti wireless per il monitoraggio ed è sicuro che, quando si riuscirà a risolvere le problematiche che presentano, la richiesta di questi dispositivi aumenterà ulteriormente.





## **Capitolo 2. EPBD 2002/91/CE e certificazione energetica degli edifici**

Il consumo di energia pro capite è in continua crescita e la concentrazione di CO<sub>2</sub> ha lo stesso trend. Il 30% dell'energia totale consumata è imputata agli edifici (United Nations Environment Programme, 2007), In particolare negli Stati Uniti il consumo di energia imputato agli edifici è del 41% (EIA, 2011), in Europa il consumo, nel 2004, del 37% del totale, (maggiore rispetto all'industria, con il 28%, e ai trasporti, 32%), mentre in Gran Bretagna tale valore si attesta intorno al 39%, leggermente superiore all'Europa (P'erez-Lombard, 2008).

Queste statistiche sono utili per mettere in luce che questo settore sia uno dei più importati sui quali intervenire con strategie atte alla riduzione dell'energia primaria consumata e, di conseguenza, delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

L'Unione europea nei primi anni del 2000 ha iniziato un percorso normativo per il raggiungimento degli obiettivi posti dal protocollo di Kyoto del 1997 e, nel 2002, ha emesso la direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia, chiamato EPBD (Energy Performance of Building Directive), la prima direttiva nel continente nel settore dell'energetica degli edifici.

Tale direttiva ha emanato alcune istruzioni che possono però essere recepite o meno e trasformate in legge da ogni Stato Membro. In generale comunque si può affermare che l'EPBD è stata alla base di tutta una legislazione comune nel settore delle costruzioni nel continente.

Parallelamente al concetto energetico la Direttiva Europea è utile anche ai fini della riduzione della produzione di anidride carbonica, per riuscire a rientrare nei parametri stabiliti nel protocollo di Kyoto.

Una parte fondamentale della direttiva europea è basata sulla stesura della certificazione energetica, un documento che può attestare il consumo energetico di un edificio.

Un punto focale riguarda l'indicazione, nel documento stesso, di una valutazione energetica realizzata con strumenti di calcolo oppure con metodologie di monitoraggio.

Il presente capitolo mira a portare a conoscenza delle indicazioni della EPBD riguardo i diversi tipi di valutazione dei consumi energetici utilizzando metodi di calcolo o con monitoraggi. A sostegno di tali concetti si descrive, nella seconda parte del capitolo, lo studio effettuato su un campione di abitazioni per dare conferma della criticità e della differenza che si trova nell'affrontare il problema della certificazione utilizzando due metodologie di calcolo differenti.

### **2.1. Direttiva Europea 2002/91/CE**

L'obiettivo generale della 2002/91/CE è quello di promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici, tenendo conto delle condizioni di account locali e climatiche esterne, e inoltre del clima interno e dell'efficacia in termini di costi.

I punti principali sono:

- il quadro generale di una metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico degli edifici esistenti di grandi dimensioni che sono sottoposti a importanti ristrutturazioni;
- certificazione energetica degli edifici;
- l'ispezione periodica delle caldaie e degli impianti di condizionamento negli edifici.

La presente direttiva è stata integrata dalla direttiva 2010/31/CE (maggio 2010) sul rendimento energetico degli edifici, che ha le stesse finalità di cui sopra, ma con aggiunte le seguenti:

- l'adozione di una metodologia comune per il calcolo del rendimento energetico in conformità del quadro generale comune;
- il calcolo dei livelli ottimali di costi per i requisiti minimi di rendimento energetico;
- "nearly zero-energy buildings", gli Stati membri provvedono affinché:
  - o entro il 31 dicembre 2020, tutti i nuovi edifici siano a energia quasi zero;

- dal 31 dicembre 2018, i nuovi edifici di proprietà e/o occupati da enti pubblici siano a energia quasi zero;
- elaborare piani nazionali destinati ad aumentare il numero edifici ad energia quasi zero e definire le politiche e gli obiettivi al fine di stimolare la trasformazione degli edifici ristrutturati in edifici a energia quasi zero.

La UNI/TS 11300, parte 1, definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. La specifica tecnica è rivolta a tutte le possibili applicazioni previste dalla UNI EN ISO 13790:2008: calcolo di progetto (design rating), valutazione energetica di edifici attraverso il calcolo in condizioni standard (asset rating) o in particolari condizioni climatiche e d'esercizio (tailored rating).

### 2.1.1. Metodi di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici

Per quanto riguarda il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici sono stati previsti, utilizzando la metodologia CEN, 4 tipi di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici (Tabella 2.1).

**Tabella 2.1 Tipologie di valutazione energetica degli edifici (UNI EN 15603:2008).**

| Tipo di valutazione                       | Dati di ingresso        |          |          | Scopo della valutazione   |
|---|-------------------------|----------|----------|---|
|   | Uso                     | Clima    | Edificio |   |
| Di progetto (design rating)               | Standard                | Standard | Progetto | Ottimizzazione soluzioni e permesso di costruire                              |
| Standard (asset rating)                   | Standard                | Standard | Reale    | Certificazione energetica   |
| Su misura (tailored rating)               | In funzione dello scopo |          | Reale    | Ottimizzazione, diagnosi e valutazioni economiche                             |
| Condizioni operative (operational rating) | Reale                   | Reale    | Reale    | Previsione di classificazione o dati per completamento certificato energetico |

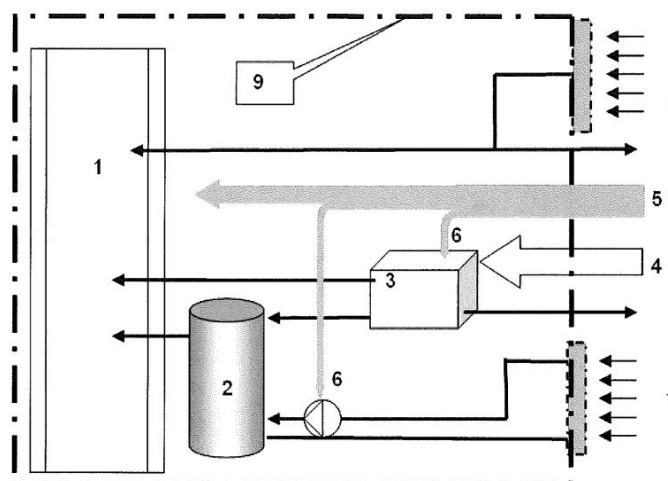
- Design rating
  - punteggio calcolato in base a condizioni standard meteorologiche e uso dell'edificio di progetto;
  - utilizzata per definire le soluzioni da ottimizzare e il permesso di costruire.
- Asset rating
  - punteggio calcolato in base a condizioni standard come meteo e uso dell'edificio;
  - definizione di "uso tipico" (simile a quanto avviene per le auto);

- utile quando si confrontano due edifici con diversi utenti.
- Tailored rating
  - la definizione degli input è in funzione dello scopo per cui è richiesta la certificazione;
  - l'edificio preso in esame è quello realmente costruito.
- Operational rating
  - basata sul consumo energetico misurato;
  - si considera come l'edificio viene utilizzato e gestito;

## 2.2. Asset rating

Dalla normativa di riferimento si capisce come la metodologia di valutazione di tipo standard è importante nella descrizione delle caratteristiche termiche degli edifici in quanto:

- il punteggio è calcolato in base a condizioni di tipo standard come meteo e uso dell'edificio;
- si realizza una definizione di " uso tipico" in base al comportamento statistico dei soggetti;
- diventa una metodologia utile quando si confrontano due edifici con diversi utenti.



### Key

|   |             |   |                         |
|---|-------------|---|-------------------------|
| 1 | user        | 6 | auxiliary energy        |
| 2 | storage     | 7 | thermal solar collector |
| 3 | boiler      | 8 | photovoltaic panels     |
| 4 | fuel        | 9 | boundary                |
| 5 | electricity |   |                         |

- **Figura 2.1 Esempi di flussi energetici come condizioni al contorno (UNI EN 15603:2008).**

Per le valutazioni energetiche “calcolate” (cioè le tipologie design, standard e tailored), la procedura generale che le accomuna è quella di calcolare il fabbisogno energetico in termini di energia primaria. Per questo motivo i consumi elettrici e termici e le produzioni di energia da fonti rinnovabili sono considerate separatamente come condizioni al contorno (Figura 2.1).

L’obiettivo dell’asset rating, come delle altre valutazioni di tipo calcolato, è la determinazione dell’energia annuale consumata che può essere fatta in due modi differenti:

- usare, per il calcolo, valori medi annuali;
- dividere il calcolo annuale in step (mensile, giornaliero, orario) in modo da valutare più dettagliatamente i consumi.

Il principio di base per il calcolo dell’asset rating è la suddivisione dei flussi energetici in guadagni e perdite in accordo con le normative: EN ISO 13790:2008, UNI EN 15241:2008, UNI EN 15243:2008 e UNI EN 15316:2011.

### **2.2.1. Software di calcolo per la valutazione di tipo standard**

Per facilitare il calcolo dei vari termini che rientrano nella sommatoria di tutti i flussi energetici ricompresi nella valutazione energetica, spesso ci si avvale di software programmati *ad hoc* per i diversi scopi. Il vantaggio di utilizzare questi strumenti è quello di prestare attenzione al solo inserimento degli input con le condizioni al contorno e non preoccuparsi della parte di calcolo.

Per eseguire il calcolo dei consumi di tipo standard, o asset rating, nello studio realizzato, si sono usati due software di calcolo in grado di definire il valore dei consumi dopo aver eseguito la modellizzazione dell’edificio e di tutti i parametri termodinamici dell’ambiente. In particolare sono stati usati i software:

- Trnsys, programma di modellizzazione in regime dinamico;
- Ecodomus, programma di simulazione in regime quasi-stazionario.

La differenza sostanziale tra i due modelli di calcolo è il regime termodinamico che si utilizza per le elaborazioni: un sistema termodinamico è definito “stazionario” quando lo stato del sistema non varia nel tempo, al contrario un sistema è di tipo “dinamico” se risulta variabile.

2.2.1.1. Regime stazionario e regime dinamico

L'introduzione precedentemente effettuata relativa ai tipi di sistemi è utile per fare il parallelo con l'analisi energetica degli edifici in quanto, se un edificio può essere definito come un sistema termodinamico (Figura 2.2) con flussi in input e in output, regolato da leggi termodinamiche si capisce l'importanza dell'uso di un software per modellizzarlo al meglio.

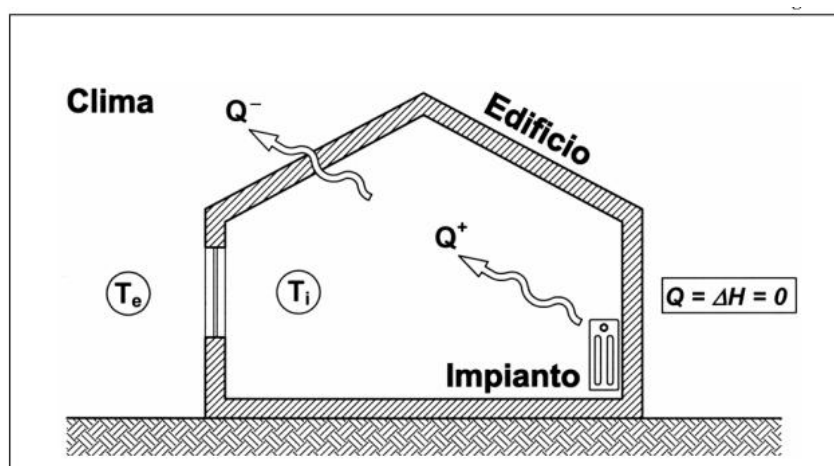


Figura 2.2 Rappresentazione del sistema edificio-impianto.

In particolare dal Primo Principio della Termodinamica

$$Q - L = \Delta H + \Delta E \quad (1)$$

dove  $Q$  è il calore assorbito dal sistema,  $L$  è il lavoro eseguito dal sistema,  $\Delta H$  è la variazione di entalpia del sistema (energia interna + energia di pressione del fluido) e  $\Delta E$  è la variazione della somma delle altre forme di energia immagazzinabili dal sistema (meccanica, cinetica, elastica); tutte le variazioni di energia devono essere calcolate come differenza tra i valori assunti nella sezione espulsione e quelli nella sezione di immissione.

Nel sistema considerato l'aria interna all'edificio non ha scambi di lavoro con l'esterno nei casi normali e neanche variazioni apprezzabili della velocità dell'aria tra le sezioni di immissione ed espulsione dal sistema, possiamo affermare che  $\Delta E = 0$  ed  $L = 0$  pertanto la (1) diventa:

$$Q = \Delta H \quad (2)$$

Ipotizzando l'aria come un gas perfetto, si può scrivere:

$$\Delta H = mc_p (T_{fn} - T_{iniz}) \quad (3)$$

dove  $m$  è la massa dell'aria contenuta nel volume delimitato dalla superficie di confine come abbiamo detto,  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'aria ed i termini tra parentesi sono le temperature iniziali e finali del sistema, ossia le temperature dell'aria prima e dopo una trasformazione termodinamica. Pertanto la (2) diventa:

$$Q = mc_p (T_{fin} - T_{iniz}) \quad (4)$$

Se si suppone il sistema edificio in condizioni confortevoli per gli occupanti, cioè la temperatura interna soddisfa la condizione di benessere termico, per fare in modo che la temperatura esterna non faccia cambiare, nel tempo, quella interna, deve essere presente all'interno del sistema l'impianto di climatizzazione che scambi una certa quantità di calore.

In particolare nella Tabella 2.2 si nota che nel periodo invernale il flusso termico dell'impianto, definito positivo, sopperisce al flusso uscente del sistema verso l'esterno e quindi mantenendo nullo lo scambio di calore complessivo attraverso il confine del sistema edificio si manterrà nulla la variazione di  $\Delta H$  della formula (2) e quindi le condizioni termiche iniziali, ritenute soddisfacenti, resteranno costanti nel tempo dato che per la (4) la  $T_{fin}$  sarà uguale a  $T_{iniz}$ .

Il ragionamento contrario avverrà in estate in cui la temperatura esterna provoca un aumento del calore entrante dall'esterno e quindi servirà l'impianto che sottrae calore per mantenere le condizioni interne di comfort.

**Tabella 2.2 Flussi termici nel sistema edificio-impianto.**

|         | $T_i - T_e$ | $Q_{disp}$ | $Q_{imp}$ | $Q = Q_{disp} + Q_{imp}$ |
|---------|-------------|------------|-----------|--------------------------|
| Inverno | $>0$        | $<0$       | $>0$      | 0                        |
| Estate  | $<0$        | $>0$       | $<0$      | 0                        |

La precedente trattazione semplifica il concetto che sta alla base del calcolo energetico degli edifici perché, come viene illustrato in Figura 2.3, l'ambiente interno degli edifici è formato da una molteplicità di fonti energetiche che evolvono con velocità e metodi differenti.

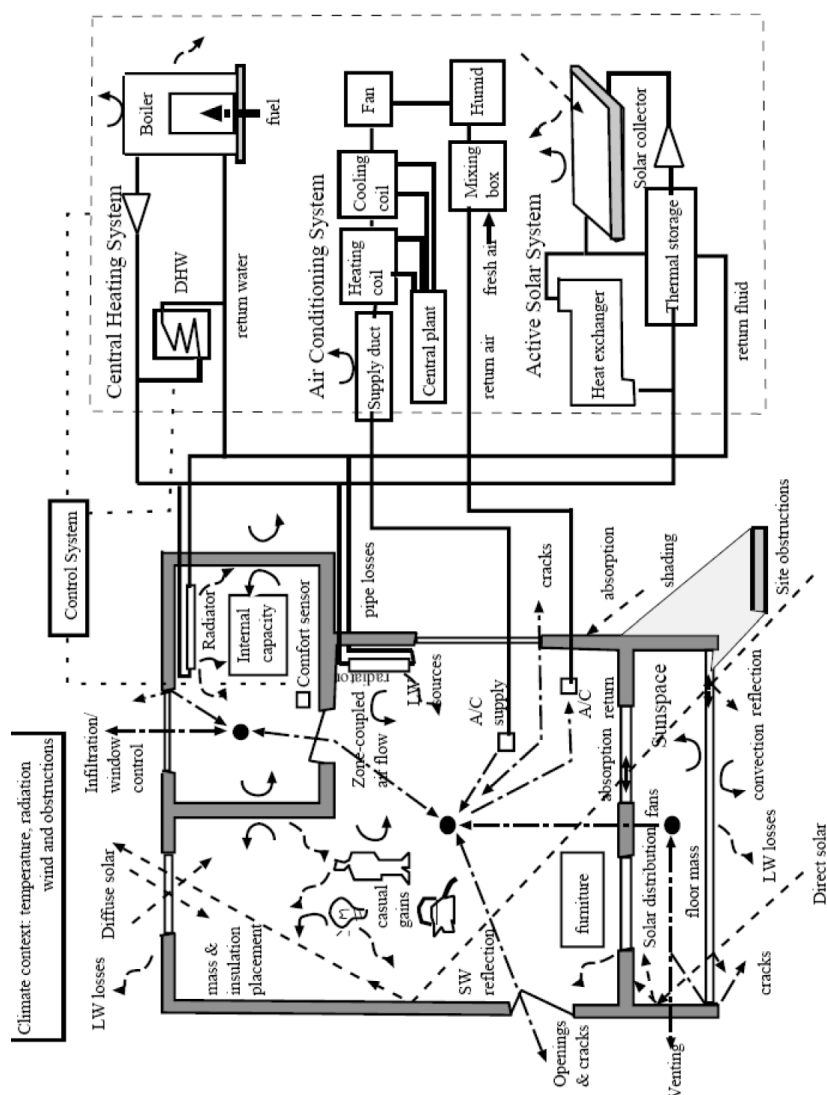


Figura 2.3 Rappresentazione dei flussi energetici presenti in un edificio (Hand, 1998).

Le sorgenti principali possono essere identificate come:

- clima esterno, le cui variabili principali (nel presente contesto) sono: temperatura dell'aria, temperatura radiante, umidità, radiazione solare, velocità e direzione del vento;
- occupanti, che provocano un apporto energetico a causa del loro metabolismo;
- sistemi ausiliari, che possono provvedere al riscaldamento, al condizionamento oppure alla ventilazione dell'ambiente interno, nonché utilizzo di apparecchiature elettriche.

Ritornando a considerare la differenza di trattazione tra sistema stazionario e dinamico si può capire che la trattazione energetica "stazionaria" non risulta rispecchiante al realtà ma



si attua qual'ora si volesse indagare una situazione che abbia una durata temporale significativa (in questo caso si parla di regime "quasi-stazionario" come nel caso in esame) per provvedere ad una semplificazione drastica dei calcoli rendendo tutte le grandezze indipendenti dal tempo.

**Tabella 2.3 Caratteristiche energetiche possibili da monitorare in regime statico e dinamico.**

|                    | Caratteristiche energetiche   |
|--------------------|---|
| Regime stazionario | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trasmittanza termica delle strutture opache e trasparenti (U)</li> <li>- Resistenza termica delle strutture opache e trasparenti (R)</li> <li>- Massa superficiali con e senza intonaco (<math>M_s</math>)</li> <li>- Coefficiente di variazione della conduttività (<math>\lambda</math>)</li> </ul>                                    |
| Regime dinamico    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trasmittanza termica periodica (<math>Y_{ie}</math>)</li> <li>- Fattore di attenuazione (f)</li> <li>- Sfasamento termico (<math>\Phi</math>)</li> <li>- Capacità termica interna ed esterna (C)</li> <li>- Adduttanza dinamica interna ed esterna (A)</li> <li>- Simulazione del comportamento orario delle strutture opache</li> </ul> |

#### 2.2.1.2. Utilizzo pratico dei modelli termodinamici

Il regime stazionario, per le teoria di base cui fa riferimento, è utilizzato per eseguire calcoli nella stagione invernale. Nel caso delle nostre latitudini la radiazione solare è poco rilevante, inoltre gli apporti gratuiti interni si prendono in considerazione solo nel caso in cui siano continui durante tutto il periodo di riscaldamento.

Le simulazioni effettuate in regime stazionario permettono di studiare solo parzialmente le reali caratteristiche di un edificio perché partono dall'assunto che la variazione periodica delle temperature e il contributo della radiazione solare possono essere trascurati, per cui è possibile utilizzare dati climatici molto aggregati (UNI 10349:1994).

Nella fattispecie il regime stazionario esclude dall'analisi i fenomeni di accumulo del calore delle pareti nel tempo e la sfasatura temporale dell'onda termica tra esterno ed interno: tutte le grandezze legate all'inerzia delle strutture e alla capacità termica diventano trascurabili nel calcolo dei carichi termici invernali.

Il caso estivo, al contrario, è notevolmente più complesso in quanto si hanno delle escursioni della temperatura esterna nell'arco della giornata molto più elevate e conseguentemente non si può assumere il regime stazionario.

In regime variabile, per calcolare il flusso termico in un determinato istante bisogna conoscere oltre alle proprietà termofisiche (spessori, densità, calori specifici e conduttività termica) anche la stratigrafia delle pareti in modo da valutare l'attenuazione e

il tempo impiegato dalla potenza termica ricevuta sulla faccia esterna a trasmettersi all'interno.

Le simulazioni effettuate in regime dinamico, quindi, permettono di realizzare un'analisi molto più realistica e completa, valutando nel dettaglio la risposta dell'involucro edilizio sollecitato da vari fattori esterni quali: la temperatura esterna, la radiazione solare, la ventilazione naturale, il comportamento degli occupanti, l'impianto di climatizzazione.

### 2.2.2. Sviluppi dei software di calcolo

Dalla differenza sostanziale tra simulazione stazionaria e dinamica si può capire che il secondo tipo di calcolo è sicuramente più complicato del primo, anche solo per le molteplici variabili che si devono considerare all'interno del sistema edificio-impianto. Per questo motivo anche i software di calcolo sono diversi: più semplice nel primo caso e più complessi nel secondo.

**Tabella 2.4 Evoluzione dei software (Clarke, 2001).**

|                             |  |   |
|-----------------------------|--|---|
| Prima generazione           | - Approccio manuale<br>- Semplificato<br>- Utilizzo limitato a specifici campi   | - Risultati indicativi<br>- Applicazioni limitate<br>- Difficoltà d'uso |
| Seconda generazione         | - Dinamica più importante<br>- Meno semplificato<br>- Ancora di utilizzo limitato  | ↓   |
| Terza generazione (attuale) | - Soluzione a seconda del tipo di problema<br>- Utilizzo di metodi numerici<br>- Visione integrata dei sottosistemi energetici<br>- Vengono considerati flussi termici e massici<br>- Interfaccia con l'utilizzo migliorata<br>- Integrazione parziale delle funzioni CABD |   |
| Generazione futura          | - Totale integrazione delle funzioni CABD<br>- Metodi numerici avanzati<br>- Basato su una conoscenza intelligente<br>- Software ingegneristici avanzati   |   |
|                             |  |   |

Al momento gli sforzi che si stanno compiendo in questo settore comprendono certamente lo studio e la formulazione di tecniche di modellazione più precise ed efficienti in termini computazionali, ma anche lo sviluppo di software più completi: ad esempio con una totale integrazione di strumenti per rappresentare la forma e le caratteristiche dell'edificio (Computer Aided Building Design) ed in grado di risolvere un più vasta gamma di situazioni sfruttando tecniche risolutive differenti.

Il processo di sviluppo appena presentato è quello più largamente accettato e riproposto in letteratura; la Tabella 2.4 ne vuole riassumere le peculiarità.

**Tabella 2.5** Classificazione dei metodi usati per l'analisi energetica degli edifici (ASHRAE, 2005).

| Method  | Data-Driven |                        |            |                                 | Comments  |
|---|-------------|------------------------|------------|---------------------------------|---|
|   | Forward     | Empirical or Black-Box | Simulation | Calibrated Gray-Box Physical or |   |
| <b>Steady-State Methods</b>                                 |             |                        |            |                                 |   |
| Simple linear regression                                    | –           | X                      | –          | –                               | One dependent parameter, one independent parameter. May have slope and y-intercept. |
| Multiple linear regression                                  | –           | X                      | –          | –                               | One dependent parameter, multiple independent parameters.                           |
| Modified degree-day method                                  | X           | –                      | –          | –                               | Based on fixed reference temperature of 18.3°C.                                     |
| Variable-base degree-day method, or 3-P change point models | X           | X                      | –          | X                               | Variable base reference temperatures.   |
| Change-point models: 4-P, 5-P                               | –           | X                      | –          | X                               | Uses daily or monthly utility billing data and average period temperatures.         |
| ASHRAE bin method and data-driven bin method                | X           | X                      | –          | –                               | Hours in temperature bin times load for that bin.                                   |
| ASHRAE TC 4.7 modified bin method                           | X           | –                      | –          | –                               | Modified bin method with cooling load factors.                                      |
| Multistep parameter identification                          | –           | –                      | –          | X                               | Uses daily data to determine overall heat loss and ventilation of large buildings.  |
| <b>Dynamic Methods</b>                                      |             |                        |            |                                 |   |
| Thermal network   | X           | –                      | –          | X                               | Uses equivalent thermal parameters (data-driven mode).                              |
| Response factors  | X           | –                      | –          | –                               | Tabulated or as used in simulation programs.  |
| Fourier analysis  | X           | –                      | X          | X                               | Frequency domain analysis convertible to time domain.                               |
| ARMA model  | –           | –                      | –          | X                               | AutoRegressive Moving Average (ARMA) model.   |
| PSTAR model   | X           | –                      | X          | X                               | Combination of ARMA and Fourier series; includes loads in time domain.              |
| Modal analysis  | X           | –                      | –          | X                               | Building described by diagonalized differential equation using nodes.               |
| Differential equation                                       | –           | –                      | –          | X                               | Analytical linear differential equation.  |
| Computer simulation (DOE-2, BLAST, EnergyPlus)              | X           | –                      | X          | –                               | Hourly and subhourly simulation programs with system models.                        |
| Computer emulation (HVACSIM+, TRNSYS)                       | X           | –                      | –          | –                               | Subhourly simulation programs.  |
| Artificial Neural Networks                                  | –           | X                      | –          | –                               | Connectionist models.   |

### 2.2.3. Difficoltà nella valutazione di tipo asset

La trattazione di tipo asset mira a valutare un tipo di approccio basato sul calcolo e sulla metodologia analitica per conoscere i consumi energetici degli edifici dove il vantaggio di tale metodologia è nell'inserimento degli input che sono di tipo standard (sia quelli climatici che di uso).

Per questo tipo di metodologia sono stati anche sviluppati numerosi software di simulazione per cercare di semplificare ma di rendere completa l'analisi energetica.

Conoscendo la complessità del sistema edificio-impianto e di tutte le variabili che interagiscono con esso, ci si pone la domanda: è più corretto semplificare il problema, il

che può portare ad una minor probabilità di errore, oppure è più indicato mirare a definire un modello molto dettagliato per la predizione del comportamento dell'edificio (Milone et al. 2009)?

Corgnati et al. (2009) hanno verificato la performance di edifici residenziali italiani utilizzando il metodo descritto trovando però delle difficoltà nella valutazione di tipo standard. Negli edifici residenziali, (in particolare case singole, la valutazione degli input definiti "standard" da normativa è influenzata da fattori stocastici (ricambio dell'aria, setpoint di temperatura in riscaldamento, modalità di funzionamento dell'impianto di riscaldamento) che rende difficile la valutazione dei consumi energetici.

Un'altra questione interessante da considerare per il calcolo in condizioni standard è il tipo di approccio (Caldera et al. 2008): si può determinare il consumo energetico dell'edificio da un modello di calcolo a cominciare da dati conosciuti dell'edificio (approccio diretto) oppure stimare l'energia usata da monitoraggi energetici (approccio inverso).

### 2.3. Operational rating

La valutazione energetica di tipo operational è utile per definire i reali consumi dell'edificio in quanto non si fanno assunzioni di tipo standard ma, le grandezze meteorologiche, l'utilizzo dell'edificio e la caratterizzazione dello stesso sono quelle realmente presenti nella realtà. Quindi si considera come l'edificio viene utilizzato e gestito ed è un metodo utile per i gestori di energia e potenziali utenti di un edificio perché include i fattori che vengono controllati.

**Tabella 2.6 Resoconto dei contributi energetici per le valutazioni energetiche di tipo operational (UNI EN 15603:2008).**

| Row | R1   | R2   | R3                       | R4  |
|-----|--|--|--------------------------|---|
|     | Units<br>(l, kg, m <sup>3</sup> , kWh, MJ, etc.) | Energy delivered<br>(Quantities)   | Gross calorific<br>value | Energy delivered<br>(Energy content in kWh or MJ) |
| L1  |  | Gas, Oil, Electricity<br>District heating, Wood<br>Energy carrier ( <i>i</i> ) |                          |   |
|     | Units<br>(kWh, MJ, etc.)                         | Energy exported<br>(Quantities)  |                          | Energy exported<br>(Energy content in kWh or MJ)  |
| L2  |  | Thermal:<br>Electrical:  |                          |   |
|     | Units<br>(kWh, MJ, etc.)                         | Renewable energy<br>produced on site   |                          |   |
| L3  |  | Thermal:<br>Electrical:  |                          |   |

Come per l'asset rating la norma UNI EN 15603:2008 suddivide i vari contributi che devono essere monitorati (Tabella 2.6):

- energia distribuita (gas, petrolio, elettricità, teleriscaldamento, legno);
- energia esportata (termica, elettrica);
- energie rinnovabili prodotte (termica, elettrica).

### 2.3.1. Metodologie di analisi

Le valutazioni di tipo operational si devono eseguire annualmente eseguendo: registrazione di dati, lettura di bollette energetiche o monitoraggi. Se questo non fosse possibile si dovranno eseguire dei metodi di interpolazione usando, per esempio, il modello della UNI EN ISO 13790:2008 per l'energia termica di riscaldamento o raffrescamento. Una metodologia di estrapolazione dei dati, applicabile in condizioni limitate, è quella di tipo lineare:

$$E = \frac{t_{an}}{t_{per}} E_{per} \quad (5)$$

dove:

$t_{an}$  è la durata dell'anno;

$t_{per}$  è il periodo considerato;

$E_{per}$  è l'energia utilizzata durante il periodo considerato.

Questo tipo di approccio, usato nella UNI EN 15603:2008, nell'equazione (5) considerando energia usata a potenza media costante, può allo stesso modo essere utilizzato anche con:

- energia consumata usando sono riscaldamento o raffrescamento;
- energia derivante da un certo numero di occupanti.

La seconda parte della norma, che descrive il metodo di valutazione energetica di tipo operativo, suddivide le tipologie di fonti energetiche e il modo di misurazione:

- carburanti misurati (elettricità, gas, teleriscaldamento);
- carburanti liquidi in serbatoi;
- carburanti solidi.

Una parte importante da tenere presente è la correzione del meteo se le misurazioni non sono state eseguite per almeno 3 anni. Tale periodo di tempo infatti è necessario per essere rappresentativo di condizioni meteorologiche medie per la località in cui è presente l'edificio.

## 2.4. Un caso studio

### 2.4.1. Introduzione

Per confermare la tesi dell'importanza relativa alla differenza tra i diversi tipi di certificazione energetica (in particolar modo tra asset rating e operational rating) si è portato a termine uno studio approfondito tra certificazione energetica realizzata con metodi di calcolo e monitoraggio dei consumi.

Lo studio riguarda una cinquantina di edifici/appartamenti in cui si sono eseguiti i calcoli di consumo energetico con l'uso di due software di calcolo:

1. Trnsys;
2. Ecodomus.

Successivamente, sugli stessi edifici modellizzati con i software, si è eseguita la valutazione dei consumi utilizzando la modalità di lettura delle bollette come previsto dalla normativa UNI EN 15603:2008.

### 2.4.2. Stato dell'arte

Lo studio eseguito è simile ad altri già realizzati in Italia, in particolare da Tronchin e Fabbri (2008) che hanno confrontato tre differenti software di modellizzazione in una casa singola a Bologna mentre Ballarin e Corrado (2009) hanno valutato la differenza tra certificazione calcolata e misurata su uno stock di edifici nella città di Torino. Un studio specifico di un edificio in un clima di montagna è stato fatto da Fabrizio e Branciforti (2010) in cui attraverso un audit energetico si sono valutate le potenziali migliorie da apportare all'edificio per renderlo di tipo ZEB (zero energy building). L'uso dell'edificio nella realtà da parte degli occupanti però, ha reso le valutazioni iniziali molto discostanti con un risparmio reale del 15% rispetto a quello ipotizzato. Dall'O' et al. (2012) hanno confrontato edifici in regione Lombardia riscontrando che dal 2007 al 2011, periodo in cui la certificazione energetica (I.R. 11/12/2006, Dgr 26/6/2007, D.G. 31/10/2007) era in essere, 2500 edifici residenziali erano in classe A ( $EP_h < 29$ ) e circa 1000 edifici in classe A+ ( $EP_h < 14$ ).

Per quanto riguarda studi sviluppati in Europa si può considerare le ricerche svolte da Audenaert (2011) che ha confrontato differenti certificazioni in Belgio, Hernandez (2008) ha fatto un esempio di certificazione energetica per una scuola primaria riscontrando una differenza tra asset rating ed operational rating rispettivamente di 53 kWh/m<sup>2</sup> e 31

kWh/m<sup>2</sup> mentre Fokaides (2012) ha eseguito uno studio di comparazione tra asset e operational rating nell'isola di Cipro confrontando le bollette e facendo compilare dei questionari agli occupanti ma senza aver effettuato monitoraggi in loco.

### **2.4.3. Metodi**

Di seguito si descriveranno le procedure per eseguire lo studio con l'utilizzo dei programmi di simulazione energetica e con i monitoraggi delle bollette energetiche.

L'uso del programma di calcolo Ecodomus, in regime stazionario, può essere usato solo per fare valutazioni energetiche nella stagione invernale.

Il software Trnsys invece, prevede di eseguire la simulazione per un intero anno ma, per eseguire il confronto con Ecodomus, si è considerato solo il consumo energetico nel periodo compreso tra il 15 ottobre e il 15 aprile (periodo invernale), come descritto dalla normativa EN ISO 13790:2008.

Utilizzando le stesse considerazioni anche per la valutazione dei consumi di tipo operational, si è proceduto alla lettura delle bollette del solo periodo invernale.

Dopo aver descritto la metodologia seguita si inseriscono, in Tabella 2.7, i parametri generali che descrivono i casi studiati. In particolare si indicano:

- le caratteristiche geometriche degli edifici/appartamenti da valutare e modellizzati;
- l'indice S/V, cioè il rapporto superficie esterna su volume, che dà un'indicazione della compattezza dell'edificio (minore è tale rapporto, a parità di volume, e minore è la superficie a contatto con l'ambiente esterno e quindi disperdente);
- i gradi giorno corrispondenti alla zona dove l'edificio è presente, indicativi del tipo di clima, livello di temperature esterne e lunghezza del periodo invernale in cui sono inseriti.

#### **2.4.3.1. Consumi di tipo standard**

L'analisi energetica effettuata con i software di calcolo, in particolare nel nostro caso, Trnsys ed Ecodomus, soddisfano al criterio richiesto dalla normativa UNI/TS 11300:2008 (metodologia CEN) che prevede: utilizzo standard dell'edificio; utilizzo dei dati meteo standard; modellizzazione dell'edificio realizzato.

Questi criteri sono adottati da entrambi i programmi di simulazione, ovviamente con tipi di input e output diversi ma, come detto precedentemente, con la differenza sostanziale tra criterio dinamico e quasi-statico.

Tabella 2.7 Caratteristiche generali dei casi studio monitorati.

| Case study | Volume [m <sup>3</sup> ] | External surf [m <sup>2</sup> ] | Internal surf [m <sup>2</sup> ] | Index S/V | Ngg  |
|------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|------|
| 1          | 481,5                    | 324,0                           | 191,0                           | 0,7       | 2477 |
| 2          | 602,9                    | 450,0                           | 194,0                           | 0,7       | 2371 |
| 3          | 170,1                    | 125,6                           | 63,0                            | 0,7       | 2423 |
| 4          | 344,3                    | 399,9                           | 114,8                           | 1,2       | 2324 |
| 5          | 454,3                    | 409,8                           | 179,9                           | 0,9       | 2395 |
| 6          | 280,0                    | 225,7                           | 100,0                           | 0,8       | 2381 |
| 7          | 408,3                    | 270,0                           | 143,3                           | 0,7       | 2541 |
| 8          | 504,5                    | 516,7                           | 161,8                           | 1,0       | 2451 |
| 9          | 386,1                    | 300,1                           | 143,0                           | 0,8       | 2412 |
| 10         | 585,8                    | 326,1                           | 204,1                           | 0,6       | 2526 |
| 11         | 310,2                    | 125,3                           | 103,4                           | 0,4       | 2383 |
| 12         | 336,9                    | 369,0                           | 105,6                           | 1,1       | 2612 |
| 13         | 241,9                    | 141,9                           | 80,0                            | 0,6       | 2383 |
| 14         | 407,2                    | 389,6                           | 147,0                           | 1,0       | 2378 |
| 15         | 238,4                    | 207,9                           | 87,0                            | 0,9       | 2477 |
| 16         | 162,1                    | 135,9                           | 60,0                            | 0,8       | 2357 |
| 17         | 495,4                    | 345,3                           | 183,4                           | 0,7       | 2324 |
| 18         | 513,2                    | 503,2                           | 190,1                           | 1,0       | 2418 |
| 19         | 765,0                    | 592,6                           | 255,0                           | 0,8       | 2378 |
| 20         | 429,6                    | 328,5                           | 148,1                           | 0,8       | 2383 |
| 21         | 283,3                    | 310,3                           | 101,1                           | 1,1       | 2378 |
| 22         | 548,1                    | 501,7                           | 203,0                           | 0,9       | 2399 |
| 23         | 220,7                    | 186,1                           | 78,8                            | 0,8       | 2536 |
| 24         | 365,7                    | 432,8                           | 135,4                           | 1,2       | 2383 |
| 25         | 284,7                    | 210,1                           | 101,7                           | 0,7       | 2383 |
| 26         | 365,7                    | 432,8                           | 135,4                           | 1,2       | 2383 |
| 27         | 310,5                    | 281,1                           | 115,0                           | 0,9       | 2612 |
| 28         | 283,5                    | 325,6                           | 105,0                           | 1,1       | 2487 |
| 29         | 128,5                    | 80,2                            | 47,6                            | 0,6       | 2348 |
| 30         | 648,0                    | 280,7                           | 240,0                           | 0,4       | 2906 |
| 31         | 272,6                    | 242,3                           | 100,9                           | 0,9       | 2360 |
| 32         | 167,3                    | 147,4                           | 55,8                            | 0,9       | 2381 |
| 33         | 212,7                    | 165,5                           | 78,8                            | 0,8       | 2345 |
| 34         | 259,4                    | 187,5                           | 91,0                            | 0,7       | 2461 |
| 35         | 324,0                    | 266,1                           | 120,0                           | 0,8       | 2383 |
| 36         | 394,4                    | 385,5                           | 155,9                           | 1,0       | 2404 |
| 37         | 707,4                    | 533,6                           | 262,0                           | 0,8       | 2345 |
| 38         | 241,5                    | 226,6                           | 115,0                           | 0,9       | 4292 |
| 39         | 297,0                    | 253,6                           | 110,0                           | 0,9       | 2360 |
| 40         | 391,5                    | 193,8                           | 145,0                           | 0,5       | 2468 |
| 41         | 267,0                    | 222,3                           | 98,9                            | 0,8       | 2470 |
| 42         | 272,6                    | 243,3                           | 101,0                           | 0,9       | 2360 |
| 43         | 268,0                    | 204,7                           | 99,2                            | 0,8       | 2371 |
| 44         | 403,8                    | 184,7                           | 144,2                           | 0,5       | 2431 |
| 45         | 513,2                    | 503,2                           | 190,1                           | 1,0       | 2624 |
| 46         | 657,7                    | 670,7                           | 254,1                           | 1,0       | 2348 |
| 47         | 637,3                    | 513,0                           | 245,1                           | 0,8       | 2799 |
| 48         | 593,4                    | 473,1                           | 202,5                           | 0,8       | 2378 |
| 49         | 152,5                    | 128,0                           | 56,5                            | 0,8       | 2383 |
| 50         | 358,3                    | 360,7                           | 132,7                           | 1,0       | 2411 |
| 51         | 313,2                    | 392,0                           | 106,1                           | 1,3       | 2327 |
| 52         | 626,4                    | 459,0                           | 232,0                           | 0,7       | 2437 |



| Case study | Volume [m <sup>3</sup> ] | External surf [m <sup>2</sup> ] | Internal surf [m <sup>2</sup> ] | Index S/V | Ngg  |
|------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|------|
| 53         | 212,7                    | 165,4                           | 78,8,0                          | 0,8       | 2345 |
| 54         | 179,1                    | 224,9                           | 73,1,0                          | 1,3       | 2462 |
| 55         | 410,4                    | 307,8                           | 152,0                           | 0,8       | 2678 |
| 56         | 433,0                    | 333,5                           | 160,4                           | 0,8       | 2383 |
| 57         | 437,5                    | 501,0                           | 156,3                           | 1,1       | 2862 |
| 58         | 598,5                    | 513,9                           | 190,0                           | 0,9       | 2427 |
| 59         | 394,5                    | 204,9                           | 125,2                           | 0,5       | 2468 |
| 60         | 266,7                    | 91,8                            | 88,9                            | 0,3       | 3059 |
| 61         | 367,2                    | 353,3                           | 128,8                           | 1,0       | 2401 |
| 62         | 469,8                    | 362,8                           | 174,0                           | 0,8       | 2383 |
| 63         | 288,9                    | 105,0                           | 107,0                           | 0,4       | 2406 |
| 64         | 854,1                    | 686,4                           | 284,7                           | 0,8       | 2662 |
| 65         | 230,1                    | 206,1                           | 85,5                            | 0,9       | 2432 |
| 66         | 446,6                    | 396,2                           | 154,0                           | 0,9       | 2431 |
| 67         | 404,6                    | 264,1                           | 109,3                           | 0,7       | 2383 |
| 68         | 330,2                    | 392,6                           | 127,0                           | 1,2       | 2384 |
| 69         | 483,1                    | 429,1                           | 161,1                           | 0,9       | 2400 |
| 70         | 602,9                    | 491,2                           | 175,8                           | 0,8       | 2466 |
| 71         | 359,1                    | 258,2                           | 133,0                           | 0,7       | 2383 |
| 72         | 332,8                    | 115,8                           | 110,9                           | 0,3       | 2371 |
| 73         | 312,2                    | 289,4                           | 115,6                           | 0,9       | 2275 |
| 74         | 336                      | 391,7                           | 120,0                           | 1,2       | 2359 |
| 75         | 311,3                    | 167,6                           | 110,0                           | 0,5       | 2348 |
| 76         | 289,2                    | 278,2                           | 107,1                           | 1,0       | 2284 |
| 77         | 423,9                    | 426,4                           | 141,3                           | 1,0       | 2427 |
| 78         | 437,5                    | 500,4                           | 156,3                           | 1,1       | 2862 |
| 79         | 598,5                    | 502,9                           | 190,0                           | 0,8       | 2427 |
| 80         | 394,5                    | 204,9                           | 125,2                           | 0,5       | 2468 |
| 81         | 657,7                    | 660,7                           | 254,1                           | 1,0       | 2348 |

Il grafico di Figura 2.4 ha lo scopo di riassumere i casi studio proposti nella Tabella 2.7 rappresentati dal rapporto S/V, che descrive le caratteristiche geometriche dell'edificio, rispetto al numero dei gradi giorno (Ngg) che definiscono la posizione geografica.

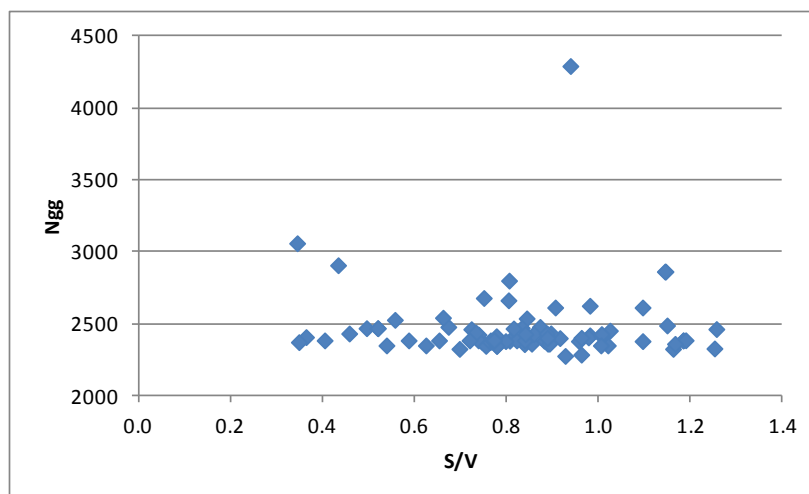


Figura 2.4 Rappresentazione dei casi studio considerati: rapporto S/V rispetto ai gradi giorno.

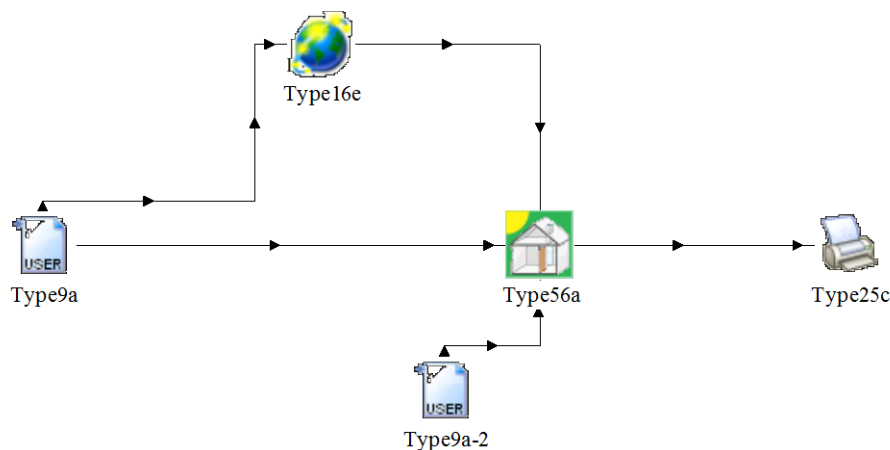
Trnsys

Per descrivere come si è realizzata la simulazione con questo software di calcolo, si farà una semplice descrizione delle azioni necessarie a delineare i limiti e le prestazioni del sistema. In primo luogo si individuano gli input energetici inseriti in Trnsys e, nello specifico, nei programmi Trnsys Simulation Studio e TRNBuild.

Tali input per i programmi sopra citati, si dividono nell'ordine in:

1. input esterni: tutti i dati che rappresentano le condizioni sito-specifiche e climatologiche del luogo nel quale è previsto di realizzare gli edifici (temperatura esterna, umidità relativa esterna e radiazione solare diretta e diffusa);
2. input interni: tutti i dati che rappresentano sia le condizioni ed i valori termoisometrici dell'ambiente interno degli edifici (temperatura interna e umidità) sia i valori dei guadagni gratuiti interni (presenza di persone e di apparecchi elettronici, importanti nello specifico, per la loro capacità di riscaldare l'ambiente per l'effetto joule).

Gli input esterni, codificati in un file formato testo, come valori orari (24 input quotidiani per tutta la durata di un anno solare così da ricomprendere tutte le condizioni climatiche) vengono inseriti nel programma Trnsys Simulation Studio attraverso la Type 9a (vedi Figura 2.5).



**Figura 2.5 Schema del simulatore Trnsys Simulation Studio.**

Quest'ultima è collegata alla Type 16e che gestisce i valori della radiazione solare in base all'orientamento geografico dell'edificio e, collegata a sua volta alla Type 56a in cui si inseriscono i dati relativi alle dimensioni geometriche dell'edificio, ne definisce i valori in base alla superficie esposta. Gli altri dati contenuti nella Type 9a e non ancora utilizzati,

cioè la temperatura e umidità relativa esterna, vengono inviati direttamente alla Type 56a per essere usati nella simulazione.

Gli input interni potrebbero essere definiti dall'utente all'interno del programma TRNBuild ma, nel caso analizzato, vengono inseriti mediante un file esterno formato testo e fatti interagire all'interno del programma attraverso la Type 9a-2 collegata direttamente alla Type 56a.

Alla fine vengono stampati tutti gli output attraverso la Type 25c collegata direttamente alla Type 56a.

### Ecodomus

Il programma Ecodomus è realizzato sulla base di un foglio di calcolo in Excel (<http://www.vienergia.it>), diviso in più sezioni (Tabella 2.8), ognuna delle quali specifica per le diverse parti del sistema edificio-impianto da analizzare.

**Tabella 2.8 Descrizione delle sezioni del foglio di calcolo Ecodomus.**

| N. sez. | Denominazione           | Descrizione delle informazioni da inserire             |
|---------|-------------------------|--|
| 0       | Dati generali           |  |
| 1a      | Pareti opache           | Inserimento della stratigrafia                         |
| 1b      | Pareti contro terra     |  |
| 1b      | Pavimenti contro terra  |  |
| 1c      | Componenti vetrate      | Inserimento dimensioni                                 |
| 2a      | Dim. pareti opache      | Inserimento dimensioni e orientamento                  |
| 2b      | Dim. part. contro terra | Inserimento dimensioni                                 |
| 2c      | Numero vetrate          | Inserimento numero e orientamento                      |
| 3       | Ponti termici lineici   | Inserimento tipologia e dimensioni                     |
| 4       | Ventilazione            | Portata di ventilazione                                |
| 5       | Impianto                | Produzione ACS, solare termico, impianto riscaldamento |
| 6       | Risultati               |  |

Il programma in esame, dopo essere stato compilato in tutte le sezioni calcola in automatico tutte le dispersioni e i fabbisogni dovuti all'edificio e restituisce la valutazione della classe energetica secondo il protocollo Ecodomus (Figura 2.6).

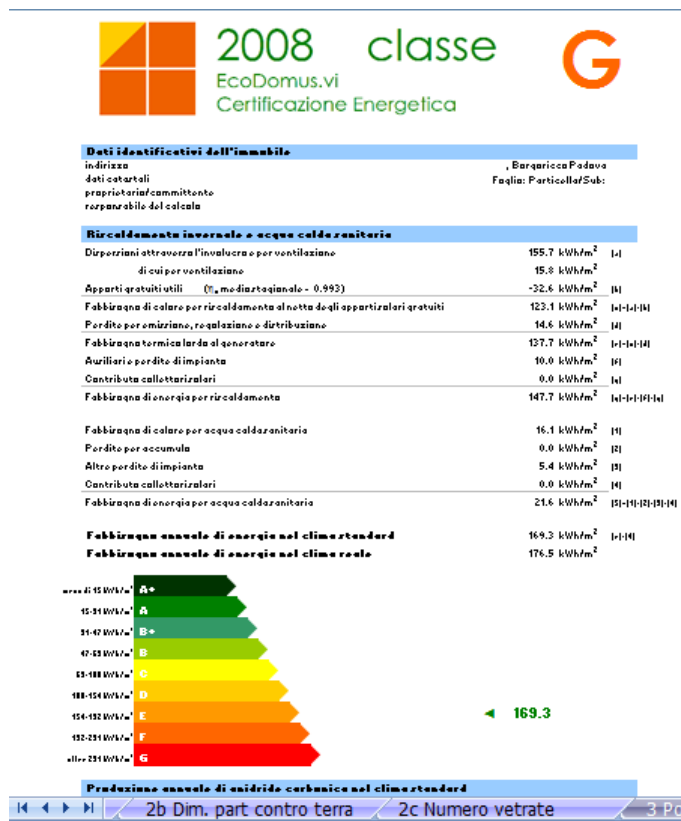


Figura 2.6 Pagina dei risultati del programma di certificazione Ecodomus.

### Risultati

Per quanto riguarda l'asset rating, si sono usati due strumenti di calcolo quali Trnsys ed EnergyPlus e si sono confrontati i risultati delle simulazioni solo per il periodo invernale. Di tutti i risultati ottenuti in automatico dalle simulazioni si sono presi in esame, per essere confrontati, solo le seguenti tipologie, riprese nella Tabella 2.9:

1. fabbisogno al netto degli apporti solari gratuiti con software Ecodomus;
2. energia netta calcolata con software di calcolo Trnsys;
3. fabbisogno lordo per riscaldamento ricavato con Ecodomus compresi ausiliari, perdite di impianto e contributo del solare termico;
4. energia per riscaldamento dell'acqua calda sanitaria.

**Tabella 2.9 Dati calcolati con valutazione di asset rating per i casi studio rilevati.**

| Case study | Net energy<br>Ecodomus<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Net energy<br>Trnsys<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Gross energy<br>Ecodomus<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | DHW<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---|---|---|------------------------------|
| 1          | 136,2   | 138,4   | 197,5   | 19,7                         |
| 2          | 179,2   | 151,1   | 291,5   | 21,1                         |
| 3          | 81,3  | 88,9  | 127,3   | 21,2                         |
| 4          | 248,6   | 191,0   | 314,0   | 20,4                         |
| 5          | 106,7   | 100,1   | 149,3   | 24,5                         |
| 6          | 142,9   | 140,3   | 225,2   | 20,4                         |
| 7          | 125,1   | 128,3   | 146,1   | 21,0                         |
| 8          | 251,2   | 259,9   | 357,2   | 21,1                         |
| 9          | 104,5   | 100,8   | 158,6   | 20,7                         |
| 10         | 84,1  | 71,8  | 99,2  | 19,1                         |
| 11         | 116,4   | 90,3  | 184,4   | 21,1                         |
| 12         | 175,9   | 146,5   | 274,2   | 20,4                         |
| 13         | 146,1   | 132,9   | 233,1   | 21,6                         |
| 14         | 180,6   | 196,1   | 489,6   | 20,4                         |
| 15         | 114,8   | 110,5   | 154,2   | 19,8                         |
| 16         | 117,1   | 97,2  | 149,9   | 36,9                         |
| 17         | 34,8  | 54,8  | 40,3  | 16,0                         |
| 18         | 149,3   | 175,2   | 198,1   | 21,2                         |
| 19         | 93,5  | 88,1  | 132,3   | 33,9                         |
| 20         | 177,0   | 144,9   | 248,0   | 29,8                         |
| 21         | 110,1   | 111,2   | 150,3   | 30,9                         |
| 22         | 108,0   | 60,1  | 118,9   | 15,4                         |
| 23         | 158,8   | 136,0   | 191,7   | 29,8                         |
| 24         | 146,3   | 223,5   | 192,3   | 25,3                         |
| 25         | 92,2  | 91,5  | 172,4   | 22,7                         |
| 26         | 146,3   | 223,5   | 192,3   | 25,3                         |
| 27         | 159,1   | 53,1  | 190,7   | 21,2                         |
| 28         | 98,4  | 52,4  | 117,5   | 40,4                         |
| 29         | 73,4  | 81,4  | 98,9  | 25,9                         |
| 30         | 104,2   | 151,0   | 149,8   | 18,7                         |
| 31         | 156,3   | 153,4   | 197,8   | 39,7                         |
| 32         | 51,2  | 22,0  | 68,6  | 25,2                         |
| 33         | 115,5   | 93,9  | 138,3   | 34,7                         |
| 34         | 209,8   | 243,0   | 255,4   | 16,3                         |
| 35         | 121,8   | 91,2  | 142,9   | 21,0                         |
| 36         | 204,7   | 192,8   | 270,8   | 20,9                         |
| 37         | 109,5   | 79,9  | 159,0   | 20,8                         |
| 38         | 145,3   | 120,4   | 179,4   | 12,0                         |
| 39         | 172,0   | 129,8   | 214,2   | 40,0                         |
| 40         | 62,2  | 30,0  | 81,4  | 20,1                         |
| 41         | 125,7   | 88,0  | 176,8   | 32,8                         |
| 42         | 156,3   | 153,4   | 197,8   | 39,7                         |
| 43         | 128,0   | 101,4   | 180,2   | 32,8                         |
| 44         | 122,1   | 98,2  | 175,4   | 20,9                         |
| 45         | 149,3   | 204,0   | 198,1   | 21,2                         |
| 46         | 129,4   | 108,0   | 153,6   | 18,7                         |
| 47         | 115,2   | 112,0   | 137,4   | 18,7                         |
| 48         | 84,4  | 67,3  | 93,4  | 15,0                         |
| 49         | 100,0   | 100,0   | 192,9   | 37,4                         |
| 50         | 153,2   | 121,3   | 195,8   | 14,8                         |
| 51         | 251,6   | 215,0   | 343,9   | 32,2                         |

| Case study | Net energy Ecodomus [kWh/m <sup>2</sup> ] | Net energy Trnsys [kWh/m <sup>2</sup> ] | Gross energy Ecodomus [kWh/m <sup>2</sup> ] | DHW [kWh/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---|---|---|---------------------------|
| 52         | 43,7                                      | 47,1                                    | 46,3  | 15,0                      |
| 53         | 115,5                                     | 93,9                                    | 138,3                                       | 34,7                      |
| 54         | 161,1                                     | 93,0                                    | 381,7                                       | 55,8                      |
| 55         | 143,6                                     | 146,9                                   | 183,4                                       | 19,9                      |
| 56         | 71,1                                      | 71,3                                    | 82,3  | 19,6                      |
| 57         | 169,2                                     | 164,8                                   | 201,9                                       | 20,5                      |
| 58         | 152,1                                     | 125,3                                   | 194,5                                       | 19,6                      |
| 59         | 132,0                                     | 120,7                                   | 164,1                                       | 20,8                      |
| 60         | 81,2                                      | 105,6                                   | 105,6                                       | 18,1                      |
| 61         | 266,2                                     | 181,8                                   | 362,7                                       | 21,5                      |
| 62         | 48,9                                      | 41,8                                    | 49,2  | 16,5                      |
| 63         | 59,6                                      | 61,3                                    | 80,3  | 23,5                      |
| 64         | 102,4                                     | 97,1                                    | 137,9                                       | 23,0                      |
| 65         | 146,7                                     | 107,1                                   | 199,6                                       | 23,6                      |
| 66         | 91,7                                      | 101,8                                   | 147,5                                       | 36,9                      |
| 67         | 136,8                                     | 127,4                                   | 201,6                                       | 22,3                      |
| 68         | 180,4                                     | 109,7                                   | 158,8                                       | 21,5                      |
| 69         | 180,7                                     | 160,4                                   | 248,4                                       | 21,4                      |
| 70         | 140,2                                     | 108,2                                   | 149,8                                       | 15,4                      |
| 71         | 99,4                                      | 75,5                                    | 143,4                                       | 21,3                      |
| 72         | 98,3                                      | 85,8                                    | 195,4                                       | 48,3                      |
| 73         | 89,0                                      | 147,7                                   | 133,7                                       | 39,5                      |
| 74         | 143,0                                     | 135,8                                   | 177,1                                       | 21,0                      |
| 75         | 127,7                                     | 127,3                                   | 166,2                                       | 21,5                      |
| 76         | 116,8                                     | 85,5                                    | 162,1                                       | 21,6                      |
| 77         | 55,9                                      | 78,2                                    | 59,8  | 16,3                      |
| 78         | 169,2                                     | 164,8                                   | 201,9                                       | 20,5                      |
| 79         | 152,1                                     | 125,3                                   | 194,5                                       | 19,6                      |
| 80         | 132,0                                     | 128,4                                   | 164,1                                       | 20,8                      |
| 81         | 129,4                                     | 108,0                                   | 153,6                                       | 18,7                      |

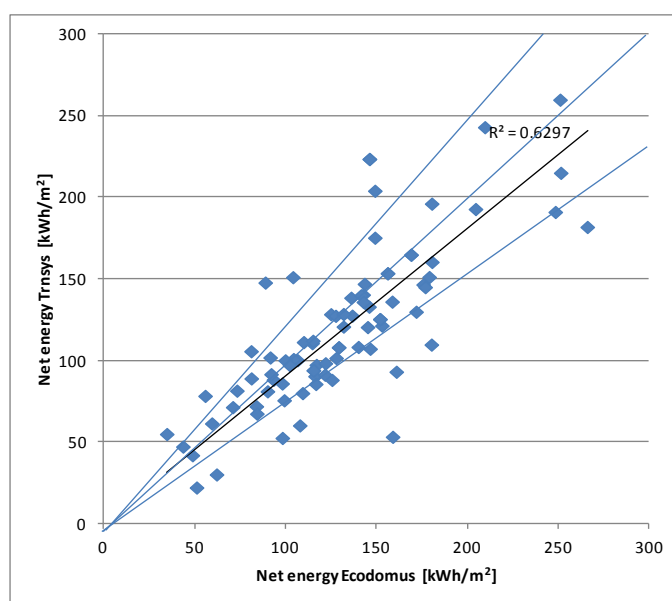


Figura 2.7 Rapporto tra il fabbisogno netto calcolato in Ecodomus e in Trnsys.

I risultati ottenuti, rappresentati graficamente nella Figura 2.7, dimostrano una buona corrispondenza tra il fabbisogno netto ricavato con i due software di calcolo usati.

In particolare, si può evidenziare che, mentre Ecodomus fa una distinzione tra fabbisogno netto e lordo dell'edificio, in Trnsys questa distinzione non è presente ma il valore dell'energia che si ricava dalle simulazioni rappresenta proprio il fabbisogno dell'edificio al netto degli apporti gratuiti e non quello lordo, come si evince dal grafico soprastante.

#### 2.4.3.2. Consumi di tipo operativo

Dopo aver calcolato i consumi di tipo standard adottando dei criteri diversi di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio, si vuole fare il confronto con i dati realmente ricavati dai consumi.

**Tabella 2.10 Valori monitorati rispettando la valutazione di tipo operational rating.**

| Case study | Thermal en.<br>gas<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Thermal en.<br>renewable<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Thermal en.<br>gas+renew.<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Electric en.<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---|---|--|---------------------------------------|
| 1          | 79,4  | 0,0   | 79,4   | 9,3                                   |
| 2          | 149,2                                       | 0,0   | 149,2  | 19,1                                  |
| 3          | 139,0                                       | 0,0   | 139,0  | 34,5                                  |
| 4          | 140,2                                       | 95,7  | 235,9  | 21,8                                  |
| 5          | 106,1                                       | 0,0   | 106,1  | 13,9                                  |
| 6          | 196,9                                       | 0,0   | 196,9  | 25,0                                  |
| 7          | 135,1                                       | 0,0   | 135,1  | 17,4                                  |
| 8          | 122,6                                       | 82,4  | 205,0  | 15,5                                  |
| 9          | 144,8                                       | 0,0   | 144,8  | 17,5                                  |
| 10         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 11         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 12         | 0,0   | 243,1   | 243,1  | 24,1                                  |
| 13         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 14         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 15         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 16         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 17         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 18         | 95,6  | 56,8  | 152,4  | 13,2                                  |
| 19         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 20         | 187,8                                       | 0,0   | 187,8  | 19,0                                  |
| 21         | 92,2  | 89,0  | 181,2  | 24,7                                  |
| 22         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 23         | 105,5                                       | 43,7  | 149,2  | 37,2                                  |
| 24         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 25         | 163,2                                       | 0,0   | 163,2  | 20,1                                  |
| 26         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 27         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 28         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 29         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 30         | 81,4  | 0,0   | 81,4   | 10,4                                  |
| 31         | 193,8                                       | 0,0   | 193,8  | 24,8                                  |
| 32         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |

| Case study | Thermal en.<br>gas<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Thermal en.<br>renewable<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Thermal en.<br>gas+renew.<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Electric en.<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---|---|--|---------------------------------------|
| 33         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 34         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 35         | 64,9  | 59,2  | 124,1  | 36,0                                  |
| 36         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 37         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 38         | 0,0   | 186,5   | 186,5  | 9,7                                   |
| 39         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 40         | 54,8  | 0,0   | 54,8   | 23,0                                  |
| 41         | 131,4                                       | 0,0   | 131,4  | 25,3                                  |
| 42         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 43         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 44         | 148,1                                       | 95,4  | 243,4  | 22,9                                  |
| 45         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 46         | 76,5  | 49,2  | 125,7  | 18,4                                  |
| 47         | 124,8                                       | 0,0   | 124,8  | 20,9                                  |
| 48         | 92,3  | 0,0   | 92,3   | 20,6                                  |
| 49         | 108,5                                       | 0,0   | 108,5  | 44,2                                  |
| 50         | 31,9  | 150,7   | 182,6  | 14,2                                  |
| 51         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 52         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 53         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 54         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 55         | 41,2  | 131,6   | 172,8  | 13,9                                  |
| 56         | 93,8  | 0,0   | 93,8   | 30,7                                  |
| 57         | 11,9  | 76,8  | 88,6   | 8,6                                   |
| 58         | 119,8                                       | 93,0  | 212,7  | 13,2                                  |
| 59         | 219,6                                       | 0,0   | 219,6  | 43,9                                  |
| 60         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 61         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 62         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 63         | 74,5  | 0,0   | 74,5   | 49,6                                  |
| 64         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 65         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 66         | 117,3                                       | 13,0  | 130,3  | 21,4                                  |
| 67         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 68         | 82,2  | 111,5   | 193,7  | 19,7                                  |
| 69         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 70         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 71         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 72         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 73         | 159,8                                       | 0,0   | 159,8  | 26,8                                  |
| 74         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 75         | 105,2                                       | 119,0   | 224,2  | 41,3                                  |
| 76         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 77         | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0                                   |
| 78         | 150,5                                       | 67,2  | 217,6  | 14,7                                  |
| 79         | 119,8                                       | 93,0  | 212,7  | 13,2                                  |
| 80         | 216,0                                       | 0,0   | 216,0  | 20,0                                  |
| 81         | 76,5  | 49,2  | 125,7  | 18,4                                  |



Il rilevamento del tipo di vettore energetico e dei valori dei consumi, sono stati effettuati dai proprietari degli immobili. Per questo motivo, non si hanno a disposizione una serie di dati omogenei per tutti gli edifici monitorati.

I monitoraggi dei consumi sono stati effettuati rispetto alle seguenti tipologie:

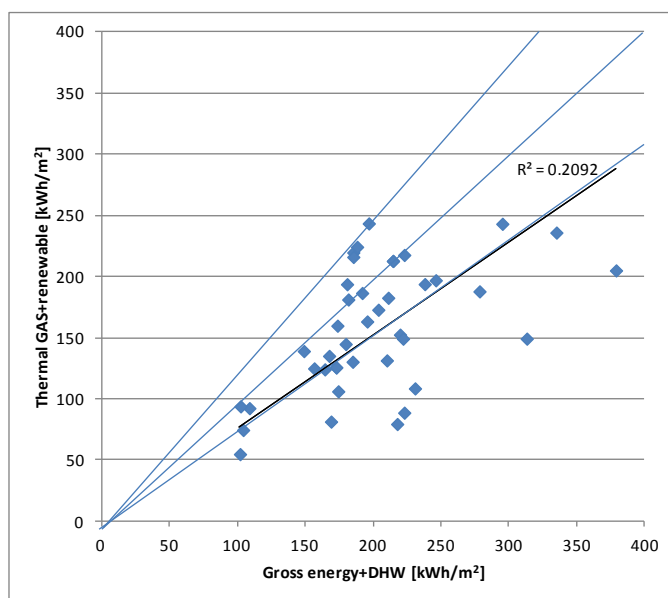
1. energia termica derivante da gas metano;
2. energia termica derivante da fonti rinnovabili (solare termico o fotovoltaico);
3. energia elettrica per alimentare gli ausiliari interni l'edificio.

#### 2.4.4. Discussione

Nella pratica delle analisi di tipo energetico degli edifici c'è una sostanziale differenza nel tipo di approccio del calcolo (se di tipo standard, asset, operational o tailored) ma lo scopo del lavoro è comunque quella di riuscire a fare un confronto tra diversi standard, in particolare quelli più usati di asset rating ed operational rating.

La teoria vorrebbe che i metodi di calcolo sempre più avanzati riuscissero a modellizzare al meglio la realtà e questo, in effetti, è avvenuto negli anni ma, non sempre questo è sinonimo di congruenza tra i diversi tipi di valutazioni.

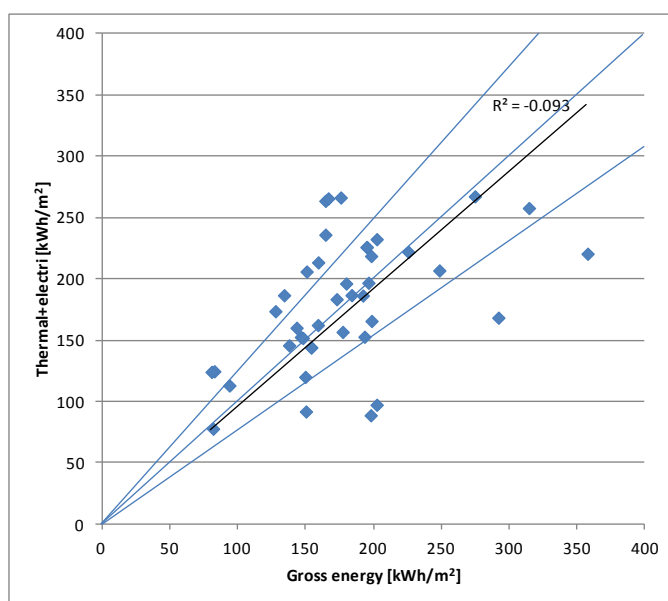
Di seguito sono rappresentati alcuni grafici utili per fare un confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate e i dati ricavati dai monitoraggi condotti.



**Figura 2.8 Rapporto tra il fabbisogno lordo di riscaldamento e acqua calda sanitaria rispetto ai monitoraggi di consumo di gas e rinnovabili.**

La Figura 2.8 descrive il rapporto tra il valore di fabbisogno lordo dell'edificio compreso di ACS, definito asset rating, rispetto al monitoraggio di energia termica derivante dall'utilizzo di gas ed energia rinnovabile (operational rating).

Si nota che il trend dei punti tende ad un valore di operational rating inferiore rispetto all'asset rating e questo si nota anche dalla posizione della linea di tendenza lineare che descrive l'andamento generale dei punti. Solo circa la metà dei valori rientra nel range  $\pm 25\%$  definito accettabile per considerare i valori confrontabili.



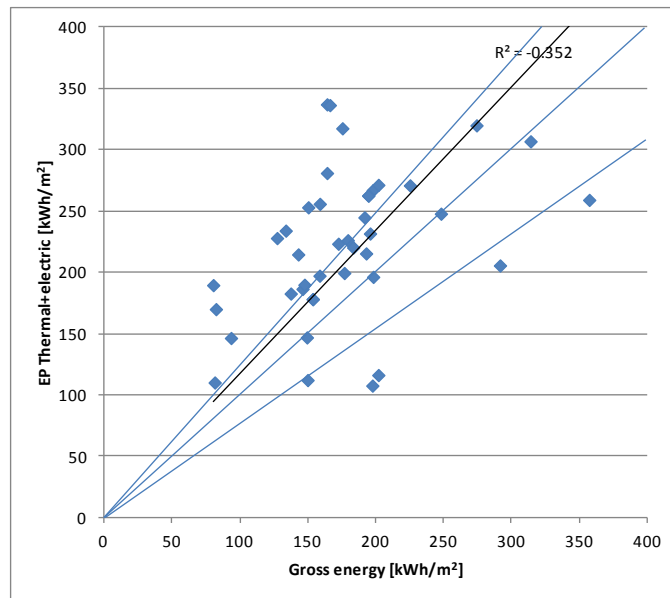
**Figura 2.9 Rapporto tra il fabbisogno lordo di riscaldamento e i monitoraggi di energia termica ed elettrica consumata.**

Considerando non solo l'energia termica di riscaldamento ma anche quella elettrica che alimenta tutti gli apparecchi elettrici interni e, quindi, gli apporti gratuiti, si può notare dalla Figura 2.9 che l'andamento di tali valori, corrispondenti all'operational rating, hanno un andamento congruo rispetto all'asset rating considerato (in questo caso il solo fabbisogno lordo al generatore) in quanto la retta di tendenza si attesta intorno alla bisettrice del grafico. Si nota però anche che il valore dell' $R^2$  è prossimo allo zero (la piena corrispondenza dei valori corrisponde ad un valore di  $R^2=1$ ) il che indica che in generale i valori sono però sparsi (quasi la metà dei punti esce dal range  $\pm 25\%$ ).

Se nell'asse delle ordinate si inserisce l'energia primaria ricavata dalla somma dell'energia termica ed elettrica (utilizzando in ordine i coefficienti 1,1 e 2,5 per la conversione), si ricava il grafico di Figura 2.10. In questo caso solo circa un quarto dei

valori rientra nel range  $\pm 25\%$  e l'andamento generale porta, in questo caso, verso i valori di operational rating.

L'analisi dei grafici appena eseguito è utile per capire che la corrispondenza tra valutazioni di tipo asset e operational



**Figura 2.10 Rapporto tra il fabbisogno lordo di riscaldamento e l'energia primaria derivante dai monitoraggi di energia termica ed elettrica consumata.**



## Capitolo 3. Metodi di previsione

Conoscere il futuro per capire come comportarsi in ambito lavorativo, economico o generalmente strategico, è sempre stata un desiderio dell'uomo fin dalle sue origini.

I ritmi sempre più forsennati dell'era moderna ha sicuramente accentuato questo processo e l'accelerazione tecnologica ha permesso di creare degli strumenti matematici o statistici per avvicinarsi allo scopo.

La previsione è uno strumento importante per una pianificazione efficiente perché rende il soggetto meno esposto ad eventi inaspettati in quanto lo rende consapevole, in modo più scientifico, della conoscenza dell'ambiente in cui opera.

Fra gli scopi per i quali lo strumento previsivo è di cruciale importanza ricordiamo:

- utilizzo efficiente delle risorse: programmazione della produzione, organizzazione dei trasporti, del personale, ecc.. I fenomeni da prevedere sono costituiti da: livello della domanda, del materiale, del lavoro, ecc.;
- approvvigionamento delle risorse: è importante prevedere le necessità future di materiali, prodotti, ecc. perché esiste un certo intervallo di tempo per ottenerli;
- determinazione dell'ammontare delle risorse necessarie: tutte le organizzazioni devono determinare le risorse che saranno necessarie nel lungo termine.

Le tre categorie sopra individuate si riferiscono a tre tipologie di previsioni: di breve, di medio e di lungo periodo. Questo significa che una organizzazione che vuole predisporre un sistema previsivo, dovrà seguire approcci differenti.

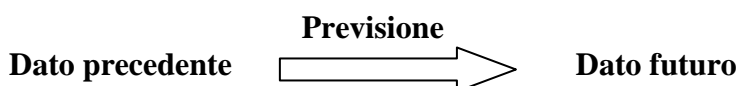
Ma cosa prevedere? Nel settore energetico le previsioni hanno lo scopo di valutare i consumi futuri in modo da realizzare un risparmio economico derivante dall'acquisto dell'energia in un momento in cui questa costa meno.

Nel presente capitolo si vuole fare una panoramica teorica dei metodi di previsione per stilare successivamente uno stato dell'arte dei sistemi previsionali nel campo dell'energetica degli edifici.

Questo permetterà di capire le scelte realizzate nel progetto di dottorato, e in particolare nel programma di automatizzazione stilato, per la previsione dei consumi energetici di tipo termico e delle temperature all'interno dell'edificio monitorato.

### 3.1. Caratteristiche generali

La prerogativa dei metodi di previsione è la relazione causale tra causa ed effetto. Se la relazione è puramente casuale o non dipendente da alcuna relazione, non è possibile predire quello che potrà accadere. Al contrario se si notano delle correlazioni tra variabili, si potranno utilizzare queste per eseguire delle prospettive future.



Le caratteristiche principali attribuibili ai modelli previsionali sono:

- essere basate su una relazione di causalità;
- essere generalmente sbagliate: per Niels Bohr “Prediction is very difficult, especially about the future” (Ellis, 2011);
- richiedere più di un valore: c'è bisogno di una distribuzione di probabilità per definire dei modelli su cui basare la previsione;
- fare previsioni a breve termine: la previsione a lungo termine è meno precisa in quanto entrano nell'orizzonte temporale molte variabili di cui non si tiene conto;
- usare differenti approcci: se la previsione è supportata da più modelli può essere più veritiera;
- usare qualsiasi altra informazione conosciuta: non si può pensare di stimare accuratamente la domanda futura se non si prendono in considerazione gli aspetti che possono influenzarla.

#### 3.1.1. Tipi di previsioni

I modelli trattati in letteratura, ciascuno con le caratteristiche e le proprietà che li contraddistinguono, possono essere classificati in tre categorie:

- modelli deterministici, o a scatola bianca (White-box Model): sono modelli in cui le leggi sono note e si possono ricostruire da leggi fisico-matematiche;

- modelli stocastici, o a scatola grigia (Grey-box Model): sono modelli costituiti da leggi matematiche ma con alcuni parametri sconosciuti che devono essere determinati con altre metodologie;
- modelli neurali, o a scatola nera (Black-box Model): tali modelli non permettono la visualizzazione delle relazioni tra input e output.

### 3.1.2. Orizzonte temporale della previsione

In genere sono utilizzate diverse tecniche di previsione in base al periodo temporale cui si fa riferimento. Aumentando il periodo di previsione (in Figura 3.1 si evidenziano i metodi in relazione all'orizzonte temporale) si aumentano le variabili che possono determinare il successo o meno del metodo previsionale (Michielan, 2002).

Da questo si comprende perché, per orizzonti più lontani nel tempo, i metodi di tipo qualitativo sono più efficaci rispetto a quelli di tipo quantitativo.

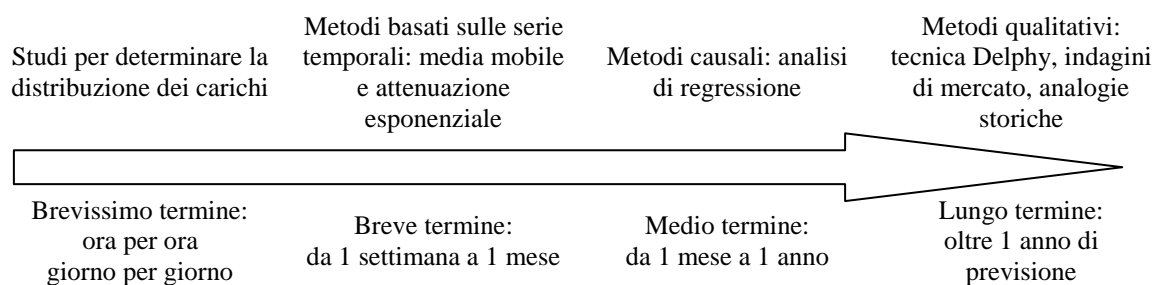


Figura 3.1 Metodi di previsione in funzione dell'orizzonte temporale previsto.

## 3.2. Modelli deterministici

Sono modelli sviluppati secondo l'approccio tradizionale (detto anche modello statistico), in queste metodologie le equazioni che descrivono i modelli sono determinate in base alla conoscenza di leggi naturali.

Il modello deterministico si può scomporre in componenti tendenziali, cicliche e/o stagionali in cui la differenza tra i dati teorici e il rilevamento degli stessi viene attribuita ad una componente casuale.

Le tecniche proposte in letteratura sono numerose e prendono generalmente il nome dal tipo di modello utilizzato, dall'elemento più rappresentante del procedimento o dal nome del suo ideatore.

I metodi previsionali di tipo deterministico possono essere divisi in due macro-aree in relazione alla possibilità o meno di rielaborare i dati per la previsione stessa con modelli matematici o meno.

### **3.2.1. Metodi qualitativi**

I metodi di tipo qualitativo permettono una previsione soggettiva e discrezionale. Questo tipo di approccio è basato sui giudizi e sulle opinioni. L'approccio non è quindi basato su alcuna teoria matematica o statistica in quanto non si dispone di dati storici. Per esempio rientrano in questi approcci le valutazioni basate su un sondaggio (questionari o chiamate telefoniche) o utilizzando un metodo interattivo attraverso più fasi di valutazione come il metodo Delphy (usato per la prima volta dalla Rand Corp. nel 1950).

#### **3.2.1.1. Bottom up**

Il metodo bottom up elabora la previsione avendo a disposizione input che derivano dal fondo della gerarchia distributiva, concernenti l'oggetto di previsione. Nello specifico, per esempio considerando la previsione delle vendite complessive, essa può scaturire dalla combinazione di input da ogni venditore, il soggetto più vicino al cliente.

#### **3.2.1.2. Ricerca di mercato**

Attraverso la ricerca di mercato si procede alla raccolta dei dati mediante diversi sistemi per testare le ipotesi del mercato. Metodo tipicamente applicato al prodotto, per prevedere le vendite nel lungo periodo e le vendite dei nuovi prodotti.

#### **3.2.1.3. Panel consensus**

Vengono definite panel consensus le riunioni allargate in cui ognuno può liberamente esprimere le proprie idee. Lo scopo è capire le visioni di più soggetti (e non solo del singolo) per realizzare delle previsioni migliori.

#### **3.2.1.4. Analogia storica**

Usando l'analogia storica si relaziona la voce "oggetto di previsione" con articoli simili. La tecnica viene utile quando si vuole pianificare nuovi prodotti avendo a disposizione delle previsioni storiche di un prodotto analogo.



### 3.2.1.5. Metodo Delphy

Nel metodo Delphy dei gruppi di esperti rispondono ad un questionario e successivamente un moderatore elabora i risultati: poi lo stesso formula un nuovo questionario da proporre al gruppo. Ad ogni round, ricevendo nuove informazioni, il gruppo fruisce di un processo di apprendimento e non risente di influenze esterne come pressioni del gruppo o sottomissione da parte di soggetti in posizione dominante.

## 3.2.2. Metodi quantitativi

### 3.2.2.1. Analisi serie storiche (o temporali)

Le analisi che si eseguono con questa tecnica sono basate sul concetto che l'evoluzione nel passato continuerà nel futuro influenzando la previsione (Caprioli).

La scelta del modello previsionale dipende dall'orizzonte temporale, dalla disponibilità dei dati, dalla precisione richiesta, dalle dimensioni del budget di previsione e dalla disponibilità di personale qualificato.

Le serie temporali si possono dividere in base all'orizzonte temporale che analizzano: stazionarie, trend-based e stagionali.

La diversità dei metodi di analisi dipendono dall'importanza che si vuole attribuire ai dati e alla loro complessità:

- media mobile;
- attenuazione esponenziale.

### Media mobile

Questo metodo di previsione è adatto con una domanda di tipo stazionaria in quanto prevede un numero prefissato delle ultime osservazioni della stessa; può essere a sua volta suddivisa in media mobile semplice e ponderata.

La media mobile, in generale, assume la domanda come

$$Y_t = \bar{d} + \varepsilon_t$$

con:

$Y$  = domanda nell'istante  $t$

$\bar{d}$  = domanda attesa

$\varepsilon_t$  = rumore

La *media mobile semplice* assume che la media sia ragionevolmente predittiva del comportamento futuro. La formula su cui si basa il modello è

$$F_t = \frac{A_{t-1} + A_{t-2} + \dots + A_{t-n}}{n}$$

considerando che:

$F_t$  = previsione per il periodo entrante

$n$  = numero periodi

$A_{t-1}$  = domanda effettiva nell'ultimo periodo fino a  $n$  periodo indietro

La *media mobile ponderata*, al contrario della media mobile semplice che attribuisce ugual peso a ogni componente del proprio registro dati, ammette di attribuire pesi diversi a diversi periodi analizzati. La formula utilizzata è

$$F_t = w_1 A_{t-1} + w_2 A_{t-2} + \dots + w_n A_{t-n} \Rightarrow \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Si può affermare che i pesi danno maggiore importanza ai dati più recenti rispetto ai dati lontani nel tempo.

### Attenuazione esponenziale

Col metodo dello *smorzamento esponenziale* per la previsione delle osservazioni della domanda viene attribuito un peso progressivamente minore alle osservazioni più vecchie ma, a differenza della media mobile, considera tutte le osservazioni passate della domanda. La domanda è modellizzata come nel modello media ponderata mentre il modello della previsione assume la forma

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1})$$

dove:

$F_t$  = valore della previsione nell'istante  $t$

$A_{t-1}$  = domanda reale nel periodo precedente

$\alpha$  = coefficiente di smorzamento

Il metodo può diventare *smorzamento esponenziale con trend* se lo smorzamento può essere corretto ulteriormente, previo adeguamento del trend, con un'altra costante di smorzamento  $\Delta$  (delta) che attenua l'impatto dell'errore che insorge fra la realtà e la previsione.

### 3.2.2.2. Relazioni causali

I metodi causali esaminano la dipendenza della domanda da varie possibili cause con lo scopo di fare previsioni sul valore della domanda in condizioni simili ma non identiche a quelle note.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

y = valore della domanda nel periodo futuro

x = valori di grandezze assunti in passato o al presente, detti fattori

Anche per questo tipo di metodi quantitativi ci sono varie teorie alla base che possono aiutare nella previsione.

### Metodi di regressione

Suddivisi in *regressione lineare* (Amadio, 2012) quando si considera una sola variabile esplicativa, con l'andamento assimilabile ad una retta, mentre *regressione multipla* quando le variabile esplicative sono maggiori di una (è l'estensione del caso precedente).

Considerando la regressione lineare il modello su cui si basa è l'equazione di una retta:

$$Y_t = a + bx$$

in cui:

Y = previsione della domanda (variabile dipendente)

x = periodi di previsione (variabile indipendente)

a = stima dell'intercetta della linea

b = stima del coefficiente della pendenza della linea

Per tracciare la linea di regressione bisogna stabilire i valori dei coefficienti a e b che riducano al minimo la somma degli scarti quadratici.

### Componenti principali e analisi fattoriale

Questo metodo permette di individuare un insieme molto più ristretto di variabili ( $x'_1, \dots, x'_n$ ) significative a partire da un campione più generale di fattori prescelti ( $x_1, \dots, x_n$ ); ad esempio possono essere combinazioni lineari.

La condizione per il calcolo dei nuovi fattori prevede che gli stessi debbano rientrare entro i limiti di errore sufficienti a descrivere y.

### 3.3. Modelli stocastici

Questi modelli previsionali, secondo l'approccio moderno, assumono che il processo descritto sia stato generato da un processo stocastico esprimibile secondo un modello probabilistico parametrico.

Ovviamente i modelli stocastici sono anche più affidabili in quanto, proprio perché tengono conto del caso, sono capaci di fornire risultati più aderenti alla realtà.

In genere i modelli stocastici hanno una struttura più complessa di quelli deterministici e i calcoli vengono eseguiti sempre con l'ausilio del computer.

La letteratura tecnica, al giorno d'oggi, si è tutta rivolta a questi metodi in quanto più precisi ma, vista la loro complessità, di seguito saranno descritti solamente in maniera basilare per avere un minimo di teoria che poi si ritroverà nello stato dell'arte.

Il processo stocastico è un fenomeno la cui evoluzione temporale dipende da fattori casuali o nei quali è presente una componente accidentale (<http://www.treccani.it>).

Nella teoria della probabilità, invece, si indicano i modelli matematici impiegati per analizzare lo sviluppo temporale di tali fenomeni, rappresentati in termini di una famiglia di variabili casuali collegate tra loro da relazioni probabilistiche.

Il modello stocastico riproduce l'andamento temporale dei dati senza però fornire informazioni sulla struttura interna del sistema. Per la sua taratura ha bisogno di una grande quantità di dati anche se la struttura è molto semplice.

È uno strumento vantaggioso quando si vuole ottenere uno strumento operativo che riproduca al meglio l'andamento osservato in uscita.

$$y_t = a_1 y_{t-1} + \dots + a_n y_{t-n} + b_1 u_{t-1} + \dots + b_m u_{t-m} + \varepsilon_t + c_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + c_n \varepsilon_{t-n} \quad (6)$$

Come si nota dalla (6) l'uscita è dipendente da una parte auto-regressiva ( $y$ ), dall'ingresso deterministico ( $u$ ) e dal rumore ( $\varepsilon$ ), come rappresentato nella Figura 3.2.

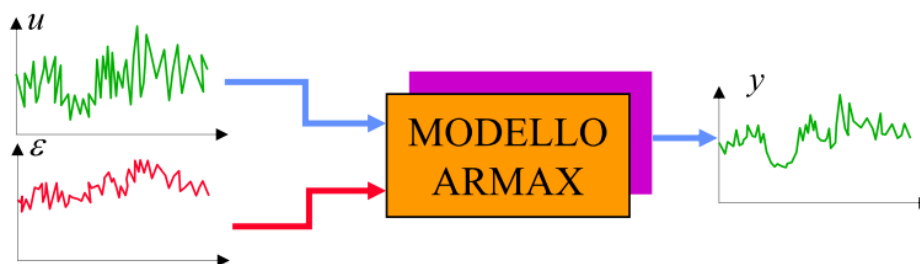


Figura 3.2 Rappresentazione di un sistema stocastico (<http://www.dsi.unifi.it>).

### 3.4. Modelli neurali

Si definiscono reti neurali i modelli che cercano di replicare il funzionamento del cervello umano (attraverso nodi artificiali che simulano i neuroni e modellizzati con processi informatici) e lo adattano a differenti situazioni in cui lo scopo sia quello di avere rapidamente delle informazioni ma derivanti da complesse rielaborazioni.

Una rete neurale è il risultato delle relazioni di numerosi neuroni che si attivano per effetto del superamento di un determinato parametro (Figura 3.3) da parte di questi segnali detta funzione di attivazione, descritta dalla relazione (Bloem et al., 1994):

$$OUT = F(INPUT)$$

$$F(INPUT) = \frac{1}{(1 + e^{-INPUT})}$$

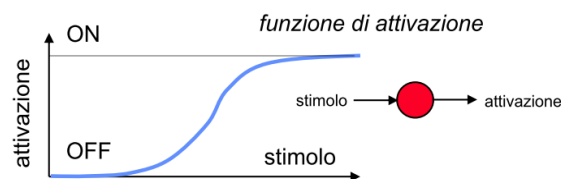


Figura 3.3 Rappresentazione della funzione di attivazione di una rete neurale  
(<http://www.dsi.unifi.it>).

La rete neurale possiede la capacità di recepire le informazioni esterne, comprenderne le regole e adattarsi all'ambiente auto-organizzandosi. La numerosità dei neuroni rendono complesso il funzionamento delle reti.

La tipica struttura delle reti neurali è a tre strati (Figura 3.4):

- input layer dal quale entrano le variabili di ingresso;
- hidden layer contenente i neuroni che aggregano le percezioni;
- output layer dal quale si ricavano le variabili di uscita.

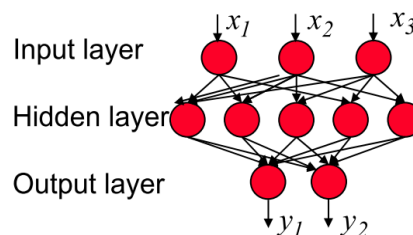


Figura 3.4 Rappresentazione della struttura di una rete neurale.

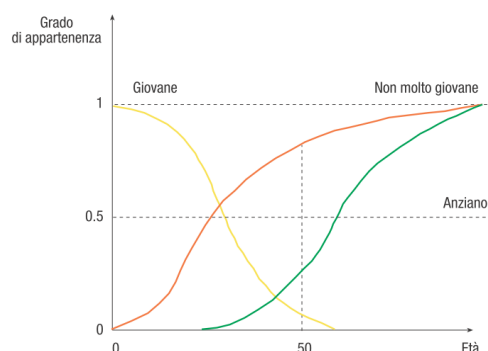
I processi di apprendimento possono distinguersi in :

- processi non supervisionati, per cui la replica della realtà deriva dall'autonoma elaborazione delle informazioni esterne;
- processi supervisionati, dove la rete riceve input ed output corrispondenti imparando il comportamento da assumere;
- processi per rinforzo, ovvero segnali di supporto offerti dall'esterno per consentire al sistema di adottare la scelta migliore.

### 3.4.1. Logica Fuzzy

La logica Fuzzy consiste in un insieme di regole deduttive che legano ingressi e uscite basandosi su predicati e connessioni “vaghi” detti fuzzy di tipo IF {ingressi} THEN {uscite} (<http://dsii.dsi.unifi.it>).

I modelli fuzzy si basano sugli insiemi fuzzy, un'estensione del concetto di insiemi (detti insiemi crisp), che hanno esteso poi i vari concetti aritmetici, logici, ecc.



**Figura 3.5 Rappresentazione del grado di appartenenza degli insiemi fuzzy (Bonarini, 2003).**

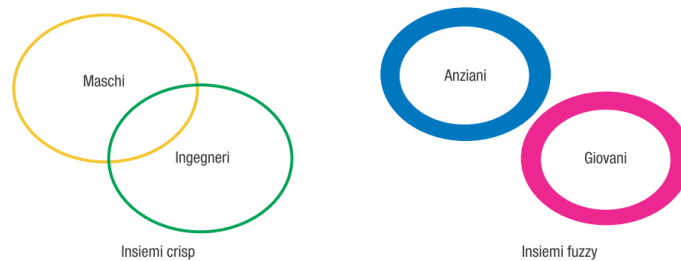
La logica fuzzy, o logica sfumata, è una logica in cui si può attribuire a ciascuna proposizione un grado di verità compreso tra 0 e 1. È una logica polivalente e, pertanto, un'estensione della logica booleana.

Con grado di verità o valore di appartenenza si intende quanto è vera una proprietà: questa può essere, oltre che vera (= a valore 1) o falsa (= a valore 0) come nella logica classica, anche pari a valori intermedi (Figura 3.5).

Si può ad esempio dire che:

- un neonato è "giovane" di valore 1;
- un diciottenne è "giovane" di valore 0,8;
- un sessantacinquenne è "giovane" di valore 0,15.

di conseguenza gli insiemi fuzzy (sfumato) non hanno una frontiera netta e marcata ma un'area in cui si trovano anche elementi classificabili come appartenenti all'insieme con un certo grado (Figura 3.6).



**Figura 3.6 Differenza tra insiemi crisp e insiemi fuzzy.**

### 3.5. Stato dell'arte

La modellizzazione degli edifici, necessaria per eseguire una simulazione energetica, è un'azione complessa e, come definito descrivendo l'asset rating (Paragrafo 2.2), può includere molti parametri spesso di difficili da reperire.

La differenza sostanziale tra una simulazione ordinaria (di tipo asset rating) e una simulazione predittiva non deriva da aspetti tecnici legati al software da usare ma nella previsione di alcuni parametri che influenzano le condizioni al contorno del sistema.

Esaminando le macro-voci indispensabili in una simulazione si considerano:

- 1- le caratteristiche geometriche dell'edificio;
- 2- le caratteristiche termoigrometriche interne;
- 3- i dati meteorologici al fine di conoscere le condizioni esterne;
- 4- la descrizione dei carichi interni;
- 5- le caratteristiche tecniche dei sistemi di climatizzazione presenti.

Alcune di esse siano immutabili nel tempo (punti 1, 2 e 5): l'edificio in esame e l'impianto di condizionamento installato o previsto non variano nel breve periodo e anche le condizioni interne di benessere sono imposte da normativa o dalle richieste dell'utente.

Le condizioni su cui si può apportare una previsione in quanto variabili nel tempo, sono le condizioni meteo e i carichi interni (punti 3 e 4). Ed è proprio per le condizioni al contorno che la tecnica utilizza i più sofisticati modelli matematici per prevedere la variazione di tali valori nel tempo in modo che, inseriti all'interno della simulazione, riescano a determinare il consumo di energia dell'edificio nella previsione richiesta.

Neto e Fiorelli (2008) hanno modellizzato l'Università di San Paolo (Brasile) e hanno comparato la previsione di consumo energetico del complesso universitario eseguita con il software EnergyPlus e una rete neurale artificiale. La previsione, nello specifico, ha riguardato i carichi interni e i dati meteo. Il risultato mostra una previsione di EnergyPlus con un errore del 13% per l'80% dei test eseguiti, in cui la sorgente di maggior incertezza deriva dalla valutazione delle sorgenti luminose, dalle strumentazioni e dall'occupazione interna.

Amjady (2001) ha proposto una modellizzazione per previsioni orarie (quindi a breve termine) per i picchi di carichi. Il confronto tra un modello auto regressivo (ARIMA) e la rete neurale è a favore del modello ARIMA: 1,5-2% contro il 2-5%.

Kalogirou (2000) ha analizzato la previsione della domanda energetica di un impianto HVAC con rete neurale; la differenza tra dati misurati e modello predittivo è tra il 2% e il 9%.

Guan (2009) ha usato quattro metodologie di calcolo per realizzare la previsione dei dati meteorologici. Il metodo statistico e il metodo imposto sono essenziali per modificare i dati meteo storici mentre il modello globale climatico e il modello stocastico sono fondamentali per calibrare il modello fisico.

Gugliermetti et al. (2004) hanno dimostrato l'importanza dei dati climatici nelle previsioni energetiche degli uffici. L'uso di dati medi mensili rispetto a quelli annuali induce una sottostima o sovrastima dei profili energetici.

Kwak et al. (2013) hanno studiato un metodo per la previsione a breve termine (4 giorni) della domanda energetica usando un metodo di previsione dei dati meteorologici. I dati previsti sono inseriti nel software BCVTB (Building Control Virtual Test Bed) che prevede l'interpolazione e la predizione dei dati meteo e inviati ad EnergyPlus che esegua la simulazione e predizione dei consumi. Il risultato è un andamento predittivo simile alle misurazioni reali ma con delle limitazioni quando ci sono i cambiamenti rapidi delle condizioni al contorno come i carichi interni.

Lo studio di Chen et al. (2012) ha lo scopo di verificare la differenza tra dati reali e previsioni usando dei software di simulazione dinamica degli edifici. I risultati sono delle previsioni con errori entro il 10% sia in periodo invernale che in periodo estivo se si utilizzano dati medi mensili mentre, se si utilizzano i dati medi annuali, la deviazione è



superiore al 20%. La percentuale di errore sale al 40% se non si considera nella valutazione l'umidità dell'aria.

Oggi, in particolare, le simulazioni dinamiche degli edifici sono dei modelli flessibili che vengono sempre più usate nella pratica e gli studi di Zmeureanu (2008), Wong (2010) e Aguiar (2002) riguardano proprio la valutazione di sistemi di riscaldamento e raffrescamento usando modelli di simulazione dinamica.



## **Capitolo 4. Reti di sensori per il monitoraggio energetico e ambientale**

L'importanza del sistema di monitoraggio è indubbia nell'ambito dell'energetica degli edifici in quanto, se da una parte i software di simulazione, sempre più specifici, sono in grado di implementare tutte le condizioni al contorno necessarie e calcolare il consumo energetico dell'edificio, dall'altra si verifica spesso, anche con riferimento alla letteratura tecnica, che dalla simulazione alla realtà i risultati sono differenti.

È questo il motivo che spinge a servirsi di precisi strumenti di misura per monitorare, oltre alle quantità finali dei consumi energetici, le grandezze interne di comfort. Sono infatti spesso queste che differiscono in maniera preponderante sulla valutazione dell'efficienza energetica teorica.

Tale condizione dipende principalmente dal fattore “umano” inserito nel contesto “edificio”. La valutazione soggettiva di comfort è stata definita nel Paragrafo 1.1.1., nella valutazione del PMV e PPD e questo, di conseguenza, rientra anche nella stima dei consumi.

La verifica delle grandezze di comfort interno, la previsione dei consumi e l'utilizzo di questi valori per la verifica delle cause del disservizio rientrano nell'ambito di ricerca del progetto SIMEA: Sistema Integrato/distribuito di Monitoraggio Energetico ed Ambientale (<http://automatica.dei.unipd.it>).

Tale progetto, finanziato dalla Regione Veneto nell'ambito del “Piano strategico per la ricerca scientifica, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione 2008-2010” e avente come capofila il laboratorio di certificazione Ri.Cert. S.p.A. e, quali partner istituzionali, il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) e di Ingegneria dell'Informazione (DEI) dell'Università degli Studi di Padova, ha come obiettivo generale la realizzazione e la validazione di una rete di sensori e dei relativi algoritmi di elaborazione dei dati finalizzati a rilevare e prevedere i principali parametri ambientali ed energetici negli edifici grazie all'uso del software EnergyPlus (Yezioro et al., 2008).

Il profilo energetico dell'edificio così valutato può essere utilizzato ai seguenti scopi:

- certificazione energetica e sanitaria;
- individuazione e implementazione di interventi di riqualificazione degli ambienti atti a migliorarne le condizioni funzionali e di comfort;
- incentivazione dell'energy awareness e utilizzo ottimizzato delle risorse attraverso un controllo automatico intelligente (sviluppo futuro ed evoluzione del progetto);
- raccolta di informazioni utili alle procedure di manutenzione (preventive/predictive maintenance).

Per quanto riguarda l'installazione della rete di sensori e il suo sviluppo prototipale, sono stati previsti due sistemi:

- sistema fisso, con sensori cablati, usati per il monitoraggio in continuo dei parametri di comfort ed energetici, con conseguente previsione del consumo, attraverso il software EnergyPlus (Baldassa et al., 2009);
- sistema mobile, con sensori wireless, usati per monitoraggi temporanei (per esempio per il monitoraggio e la certificazione in edifici esistenti o il monitoraggio preventivo per edifici in fase di costruzione, in modo da portare all'ottimizzazione della successiva e definitiva rete fissa di monitoraggio (Casari et al., 2009)).

Nei paragrafi seguenti si definiranno nel dettaglio le caratteristiche delle reti installate, degli ambienti monitorati, dei protocolli di comunicazione e del linguaggio di programmazione sviluppato per automatizzare lo scambio dei dati in input e lanciare successivamente le simulazioni (Scarpa et al., 2012).

## **4.1. Reti di sensori installate**

Il progetto prevede due tipologie diverse di reti di sensori in cui l'idea di base è la medesima ma differente è l'implementazione.

L'idea comune di entrambe le reti è che i punti di raccolta dati siano raggruppati da delle unità di raccolta, definite MiniPC e che siano queste i nodi del sistema. Questo semplifica molto l'interazione con la rete di sensori da parte dell'utente dato che esso si dovrà interfacciare con un minor numero di entità.

Le due tipologie di rete implementano questo concetto tenendo presente lo scopo per cui sono state progettate: un tipo di rete verrà utilizzato in installazioni temporanee del

sistema (Sistema Mobile, SM), mentre l'altro tipo di rete verrà installato permanentemente in un edificio (Sistema Fisso, SF).

La sostanziale discrepanza tra le due tipologie di cui sopra consiste nella connessione tra i MiniPC e i sensori: mentre nel sistema mobile la comunicazione tra sensori e le unità di raccolta verrà effettuata mediante tecniche wireless, nello specifico usando il protocollo ZigBee, nel sistema fisso lo scambio di dati avverrà per mezzo di un bus industriale cablato, nello specifico CANOpen.

#### 4.1.1. Sistema mobile

Il sistema mobile, idoneo per installazioni provvisorie, si avvale della tecnologia wireless per la comunicazione tra i sensori e i MiniPC e tra i MiniPC stessi.

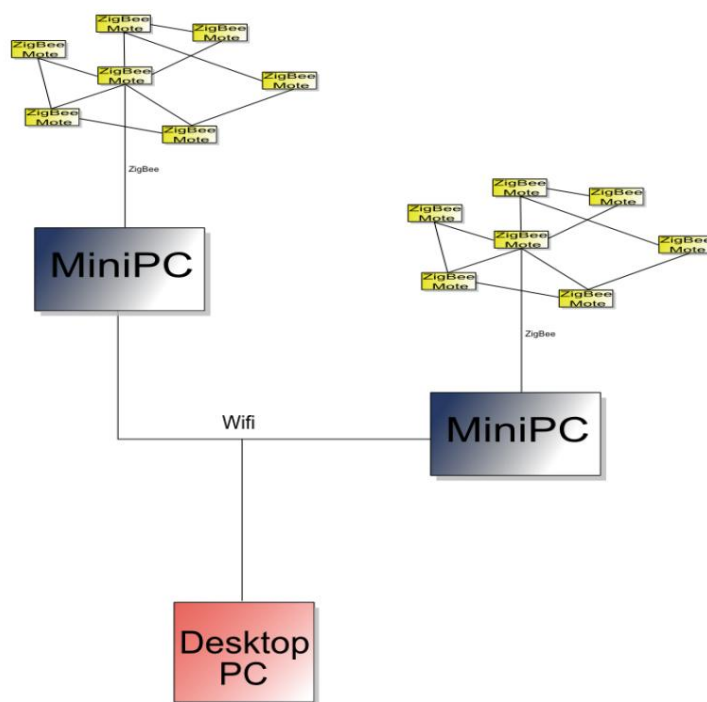


Figura 4.1 Schema a blocchi della rete wireless installata.

Per fornire connettività ai sensori (verranno utilizzati normali sensori industriali analogici), si utilizzano dei moduli ZigBee, detti mote. Questi montano a bordo, oltre al modulo di comunicazione ZigBee, anche 4 sensori standard per la rilevazione di temperatura, umidità, pressione atmosferica e luminosità, con la possibilità di avere due ulteriori sensori connessi mediante un scheda preparata appositamente per il sistema da monitorare in questione.

Ogni MiniPC è quindi dotato di un modulo ZigBee che lo rende compatibile con la rete dei mote, di cui farà anche da nodo coordinatore. Oltre alla funzione di coordinazione della rete Zigbee, i MiniPc rappresentano il punto di accesso dall'esterno alla rete di sensori, e presenteranno un'interfaccia pubblica (su socket o su web service) per accedere ai dati raccolti (Figura 4.1).

### **4.1.2. Il sistema fisso**

Il sistema fisso (o cablato) è pensato per installazioni permanenti del Sistema SIMEA. Esso si prefigge lo scopo di monitorare e fornire una visione del profilo energetico di una costruzione.

La differenza con il sistema mobile, in cui la principale tecnologia di comunicazione è quella wireless, è che nel sistema fisso si useranno mezzi di comunicazione cablati, quindi si abbandonano i protocolli ZigBee e Wifi e li si sostituiscono con bus industriali e connessioni ethernet rispettivamente. Resta comunque sottinteso che l'utilizzo di tecnologie wireless è consentito in luoghi in cui le connessioni cablate non possano essere utilizzate.

La rete fissa prevede, come il suo alter-ego mobile, la presenza dei MiniPC che raccolgono i dati dai sensori. Questi ultimi verranno connessi alle unità di calcolo mediante delle centraline che convertiranno i valori (di tensione o di corrente) dei sensori in pacchetti per il protocollo CANOpen. Questo setup permette ridurre i costi di installazione dovuti all'acquisto dei sensori, visto che il prezzo di sensori su protocollo CANOpen è decine di volte superiore a quello dei classici sensori analogici.

I MiniPC sono connessi tra loro tramite rete ethernet cablata e dove non sarà possibile utilizzare questa tecnologia si sopperirà utilizzando una rete Wifi.

In questo tipo di sistema oltre ai MiniPC, i sensori e ad uno o più Personal Computer di controllo sono presenti altri due apparecchiature: un data server e uno o più touch screen. Il primo serve a memorizzare lo storico completo dell'installazione in modo da avere sempre a disposizione tutti i dati raccolti dal sistema. I vari MiniPC invieranno periodicamente i propri dati acquisiti e quelli elaborati al server e successivamente procederemo alla cancellazione dalle loro memorie locali. Ciò permette di non arrivare alla situazione in cui i MiniPC non possono più memorizzare dati nuovi senza dover eliminare quelli vecchi.

I touch screen invece, rappresentano il pannello di visualizzazione dello stato del sistema e permettono una facile e sempre aggiornata visione dei dati acquisiti ed elaborati dal sistema SIMEA (Figura 4.2).

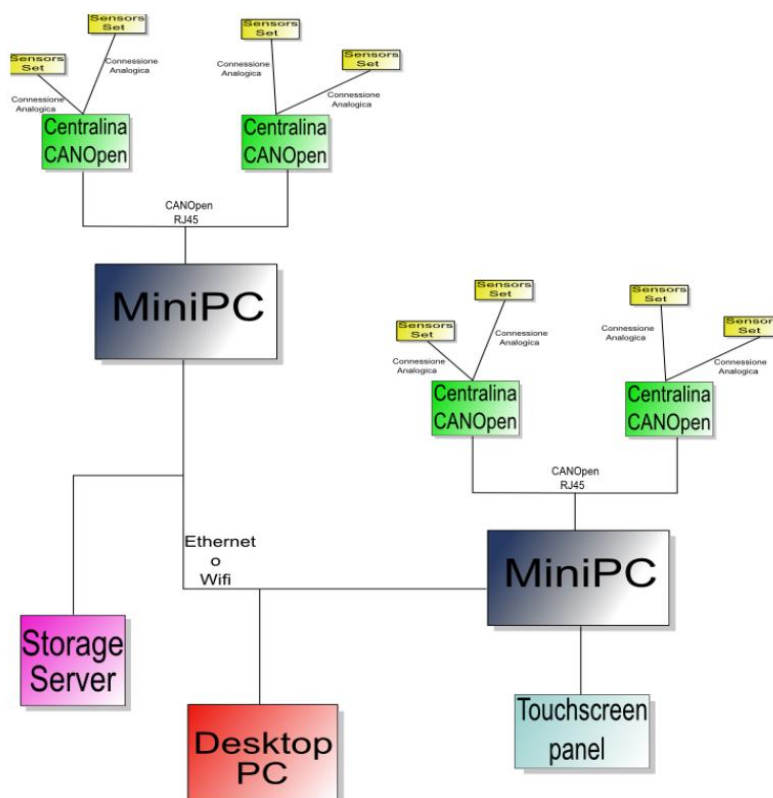


Figura 4.2 Schema a blocchi della rete wireless installata.

#### 4.1.3. Sensori installati

La prima parte del progetto riguardava lo studio e la realizzazione della rete di sensori da utilizzare per effettuare i monitoraggi nell'edificio campione.

Inizialmente si è pensato alle grandezze che si voleva monitorare, necessarie per eseguire successivamente l'analisi energetica e si è optato per sensori che monitorassero: temperatura, pressione, umidità e luminosità.

Per realizzare un'unica "postazione di monitoraggio" si è deciso di sviluppare una basetta, *mote*, in cui posizionare i sensori:

- *sensori on board*, temperatura, pressione, umidità, luminosità: sono i sensori che rimangono costanti per ogni tipo di basetta;
- *sensori esterni*: sulla basetta sono saldati 3 connettori per sensore analogico generico, in questo modo, oltre ai sensori on board, si possono in ogni momento

installare ogni tipo di sensore (CO<sub>2</sub>, formaldeide, metano, ecc.) rendendo molto flessibile il tipo di monitoraggio, non solo di tipo energetico ma anche ambientale.

**Tabella 4.1 Caratteristiche tecniche dei sensori installati on board.**

| Sensore          | Temperatura  | Pressione   | Illuminamento | Umidità     |
|------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| Tipo             | NS LM94022   | MPX6115A    | ISL29000      | HHH-5030    |
| Range di misura: | -50 - +150°C | 15 - 115kPa | 0 - 1000 Lux  | 0 - 100% RH |
| Precisione       | 1,8%         | 1,5%        | 1,5%          | 3%          |
| Tensione         | 1,5-5 V      | 4,75-5,2 V  | 2,5-5,5 V     | 5,8 V       |
| Corrente         | 5,4 µA       | 6 mA        | 1 µA          | 500 mA      |

Nel progetto sviluppato oltre ai sensori on board, descritti in Tabella 4.1, si è deciso di installare anche alcuni sensori di CO<sub>2</sub> con il duplice scopo, da una parte controllare il funzionamento dei connettori per sensori esterni e dall'altra per realizzare anche il monitoraggio del biossido di carbonio, elemento molto considerato per il comfort interno.

#### 4.1.3.1. Sensore di temperatura

Il sensore di temperatura di precisione, ha un'uscita lineare in voltaggio, proporzionale in scala Celsius (gradi centigradi). Il sensore non necessita di nessun tipo di taratura per fornire un'accuratezza di 1,5-1,8%. La bassa impedenza di uscita e l'uscita lineare rendono questo sensore particolarmente semplice da utilizzare, sia con microcontrollori che con strumenti di lettura.

#### 4.1.3.2. Sensore di pressione

Il sensore di pressione è di tipo piezoresistivo e costituito da un chip di silicio, la cui proprietà è quella di variare la propria resistenza quando viene sottoposto ad uno stress meccanico.

Di norma si parte da un chip di tipo N diffuso di Boro fino a creare gli strati di tipo P che, in questo ambito, costituiscono le resistenze. Due le cause primarie, da sfruttare, dell'effetto piezoresistivo: una longitudinale, che dà luogo ad un incremento della resistenza; l'altra trasversale con una diminuzione.



#### 4.1.3.3. Sensore di illuminamento

Il sensore ottico luce-corrente abbina un fotodiodo e un amplificatore di corrente in cui la corrente d'uscita è direttamente proporzionale all'intensità della luce sul fotodiodo. Sensibilità superiore a quella di un fototransistor, con poche variazioni. La sua sensibilità spettrale corrisponde moltissimo all'efficienza e alla linearità luminosa.

- Converte l'intensità della luce in corrente;
- Bassa corrente d'alimentazione: 1 $\mu$ A;
- Eccellente linearità d'uscita della luminosità;
- Contenitore ultra compatto e leggero, previsto per il montaggio in superficie.

#### 4.1.3.4. Sensore di umidità

Il sensore di umidità è costituito da un trasduttore a polimeri igroscopici. Queste sostanze modificano la costante dielettrica in funzione delle variazioni della pressione parziale di vapore d'acqua contenuto nell'ambiente e, quindi, delle variazioni di umidità relativa. L'elemento trasduttore fa parte di un circuito elettronico che in uscita fornisce un segnale in tensione proporzionale all'umidità relativa.

### **4.1.4. Descrizione delle reti realizzate**

Il sistema di monitoraggio installato nell'edificio campione in Ri.Cert. è formato da una serie di sensori per la misura delle varie grandezze termoigrometriche ed è diviso in due reti che differiscono per tipologia e obiettivi: una temporanea e wireless ed una permanente e cablata.

La prima è opportuna per studi temporanei di edifici o in quei casi in cui non è possibile la posa di un bus cablato. Un utilizzo potrebbe essere quello di installare questa tipologia di rete per determinare i punti più rappresentativi di un ambiente in cui installare, successivamente, i sensori della rete permanente.

La rete permanente invece, viene utilizzata quando l'edificio deve essere monitorato in maniera costante e si avvale di sensori connessi fisicamente tramite un bus di campo.

#### 4.1.4.1. Struttura a rete fissa

La rete permanente installata nel testbed è basata sul bus di campo CAN e sul protocollo CANopen., due noti standard per la comunicazione in ambito industriale.

Sono stati scelti per la loro robustezza e per la grande mole di dati che riescono a veicolare, il massimo bitrate supportato da CAN è di 1 Mb/s per brevi tratti di bus.

La rete di sensori è strutturata nel seguente modo: la scheda Coordinator assume il ruolo di *nodo master* della rete e le schede di acquisizione di dati ambientali sono connesse con delle centraline, *nodi slave*, che traducono il segnale analogico fornito dalle schede di acquisizione nel protocollo CANopen e rendono disponibili questi dati al *nodo master* (Figura 4.3).

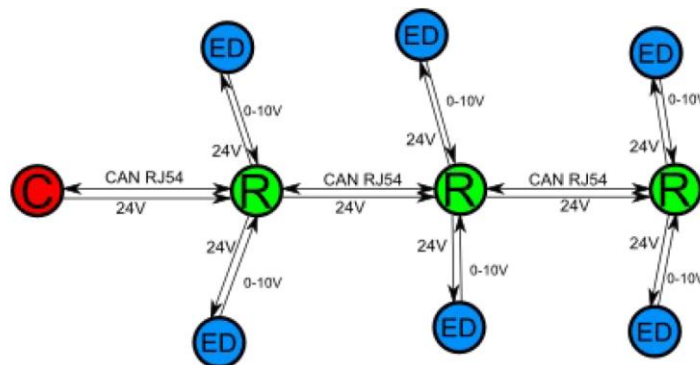


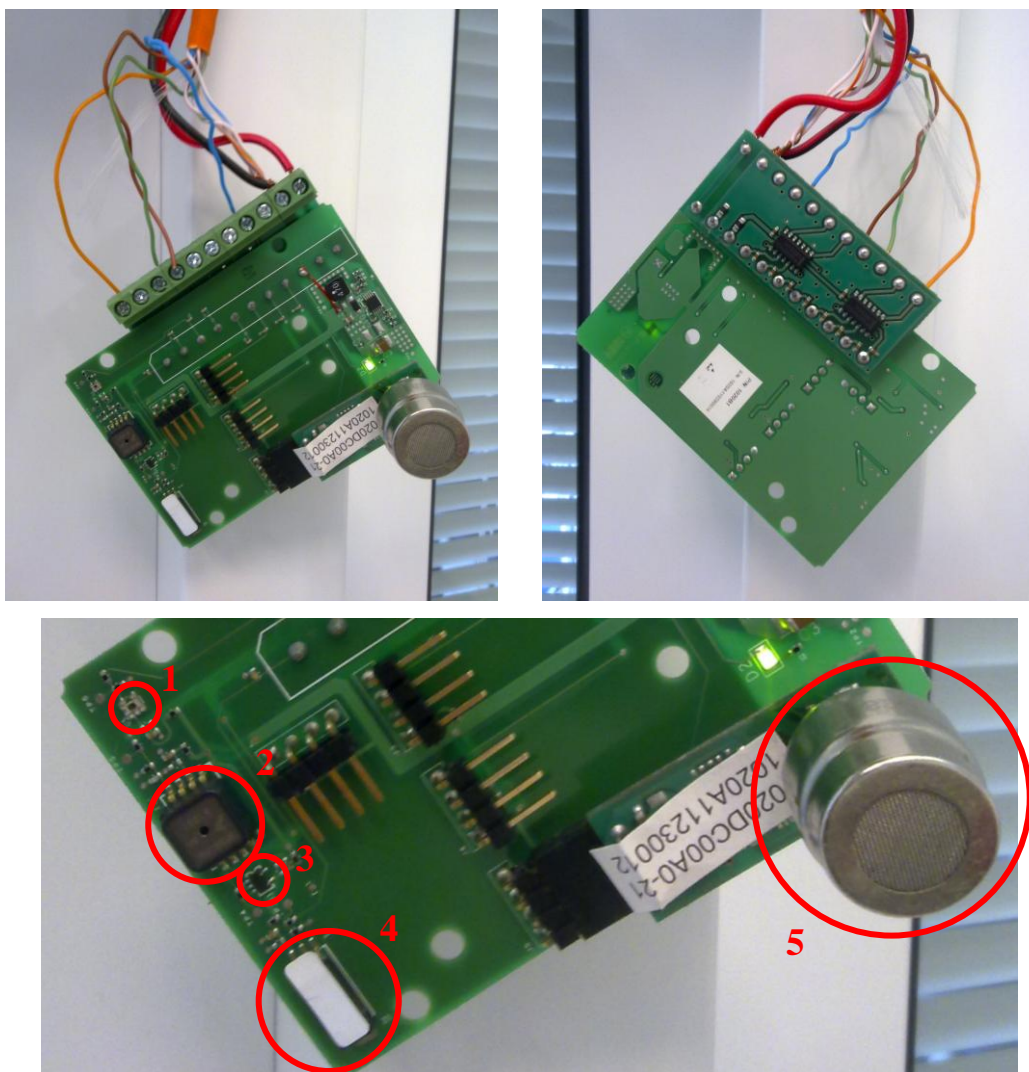
Figura 4.3 Struttura a rete fissa di tipo Can.

I dati vengono acquisiti ogni cinque secondi da ogni mote, alimentato dalla rete elettrica, equipaggiata con 5 tipi di sensori (indicati e numerati in Figura 4.4) per rilevare:

- temperatura (3);
- umidità (4);
- pressione (2);
- illuminamento (1);
- CO<sub>2</sub> (5).

Successivamente viene effettuata la media dei dati ottenuti nell'intervallo di cinque minuti (questo intervallo è configurabile). Poi i dati, ad intervalli orari, sono inviati all'unità di memoria per l'elaborazione degli stessi mediante il software EnergyPlus e la loro memorizzazione. I risultati ottenuti vengono visualizzati in un monitor touch-screen.

L'utilizzo della media viene effettuata per eliminare eventuali letture spurie date da sbalzi nella rete elettrica dell'impianto.



**Figura 4.4** Punto di monitoraggio e sensori installati della rete fissa.

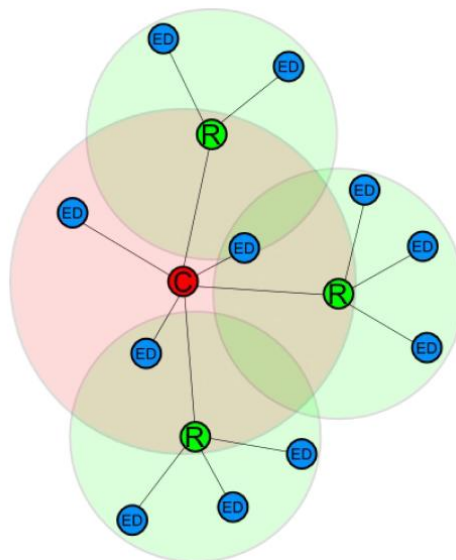
#### 4.1.4.2. Struttura a rete mobile

La rete temporanea del progetto SIMEA è formata da sensori che comunicano tra loro e con la scheda SIMEA Coordinator grazie alla tecnologia wireless ZigBee (standard IEEE 802.15.4) che sfrutta comunicazioni a bassa potenza e basso duty cycle, in cui ogni sensore è alimentato da due batterie da 1,5V.

Ogni rete di sensori ZigBee è organizzata da un nodo detto Coordinator ZigBee che provvede ad inizializzare la rete e a fornire agli altri nodi un identificativo univoco. Ogni altro nodo invia i dati acquisiti al nodo Coordinator. Nel progetto SIMEA il Coordinatore della rete ZigBee è installato sulla scheda SIMEA Coordinator e comunica con l'applicativo tramite una connessione seriale (Figura 4.5).

Concepite per un diverso tipo di lavoro, si dividono in due categorie ben distinte:

- 1- End Device: nodi ZigBee dedicati unicamente alla raccolta dati. I dati vengono acquisiti ogni 5 minuti. Nell'intervallo di tempo in cui i sensori non acquisiscono i dati il nodo entra in modalità deep sleep in cui vengono spente tutte le periferiche tranne l'orologio interno (in questo modo si preserva la carica delle batterie).
- 2- Router: i nodi di questa tipologia hanno le stesse funzionalità di acquisizione dei precedenti con la differenza che non entrano mai in modalità deep sleep tra un'acquisizione e l'altra. Questo comportamento permette di ampliare la rete estendendo il segnale fornito dal nodo Coordinatore consentendo anche ai nodi End Device lontani di poter inviare i dati acquisiti.



**Figura 4.5** Struttura a rete mobile di tipo Zigbee.

Le schede multisensore wireless hanno installato i sensori (indicati e numerati in Figura 4.6) che rilevano:

- temperatura (4);
- umidità (1);
- pressione (3);
- illuminamento (2).

La rete wireless, nel suo complesso, risulta più semplice di quella permanente perché le schede sono collegate al mini PC per l'elaborazione dei dati monitorati e poi inviati al server per la memorizzazione, senza l'elaborazione mediante il software di analisi energetica.

Un'ulteriore differenza rispetto alla tecnologia wired è l'assenza del sensore di CO<sub>2</sub> in quanto richiedeva un'alimentazione troppo elevata che avrebbe limitato la durata delle batterie nel tempo.

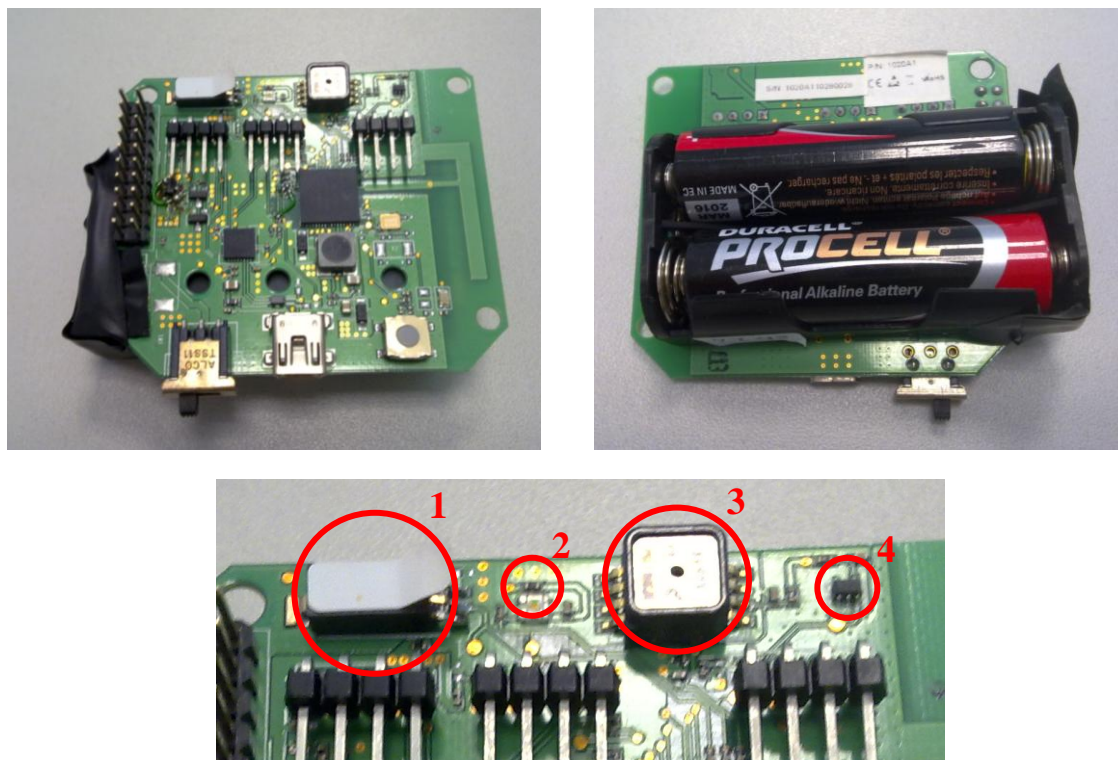


Figura 4.6 Punto di monitoraggio e sensori installati della rete mobile.

## 4.2. Ambienti monitorati

Il testbed del progetto è un edificio con ambienti adibiti a laboratori o ad uffici sito in provincia di Vicenza e i sistemi di monitoraggio sono installati nei due diversi piani della costruzione:

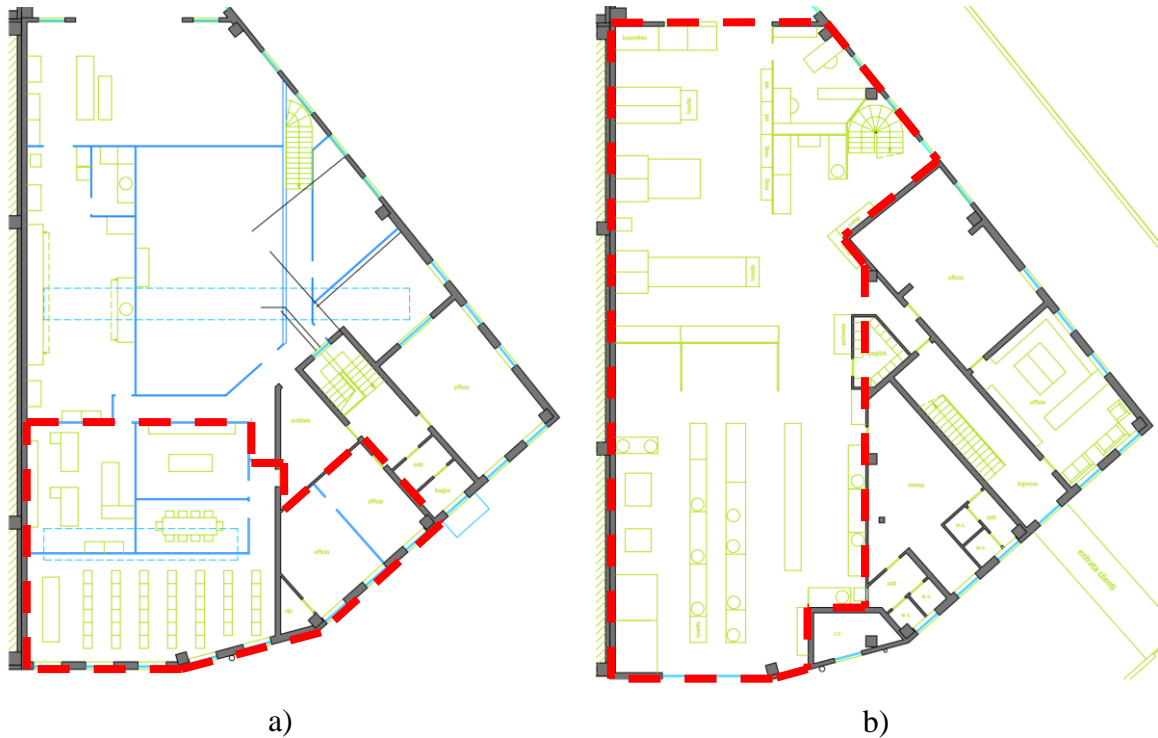
- il sistema wireless è installato al piano terra, all'interno del laboratorio di chimica;
- il sistema cablato è installato al piano primo, dove si trovano uffici e sale riunioni.

### 4.2.1. Installazione della rete fissa

Il sistema con rete fissa è usato per il monitoraggio dei valori termigrometrici degli ambienti interni e la successiva elaborazione da parte del software di simulazione dinamica necessario per determinare il consumo energetico.

Il piano primo dell'edificio è adibito ad uffici, sale riunioni e un laboratorio di microbiologia; la rete fissa di sensori è stata installata, in particolare, per monitorare 3

uffici e 3 sale riunioni. Gli ambienti sono in parte confinanti con altri ambienti interni mentre quelli confinanti con l'esterno hanno orientazioni Est e Nord-Est (Figura 4.7.a.).



**Figura 4.7 Ambienti monitorati con il sistema a) a rete fissa e b) a rete mobile.**

#### 4.2.2. Installazione della rete mobile

Il sistema di monitoraggio a rete mobile è usato per la misura dei parametri termoisometrici degli ambienti interni mentre non prevede la parte di stoccaggio e utilizzo dei dati per la successiva simulazione energetica.

Il sistema mobile è installato al piano terra del testbed, in un ambiente adibito a laboratorio di chimica. L'ambiente è un openspace confinante in parte con altri ambienti interni mentre le superfici confinanti con l'esterno hanno orientazioni Est, Ovest e Nord-Ovest (Figura 4.7.b.).



### 4.3. Interfacciamento della rete di monitoraggio con EnergyPlus

Il software di simulazione EnergyPlus è utilizzato, all'interno del sistema wired, per eseguire la simulazione energetica in regime dinamico del comportamento dell'edificio usando come input i dati monitorati.

I dati medi orari di ogni scheda multisensore sono inviati al server centrale dell'edificio monitorato e memorizzati in modo da essere usati come input dal software di simulazione (LBNL, 2011), previa elaborazione ad opera di un tool sviluppato in linguaggio C++ per l'automatizzazione del processo simulativo che seleziona gli input, lancia la simulazione di EnergyPlus e ne elabora gli output, come si evince dallo schema di Figura 4.8.

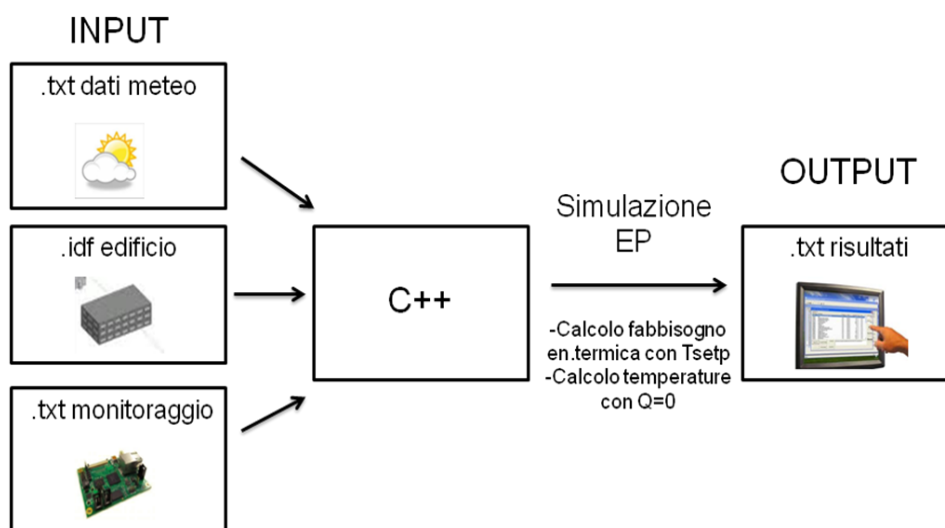


Figura 4.8 Schema della procedura di calcolo adottata.

#### 4.3.1. Input meteorologici

I dati meteo caratterizzanti la località geografica in cui si trova l'edificio testbed sono ricavati dal sito web dell'ARPA Veneto (<http://www.arpa.veneto.it>) riferiti alla stazione meteo sita a Malo (VI).

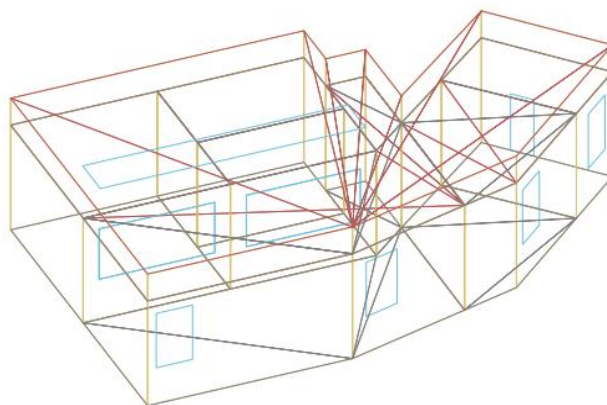
Il vantaggio nel reperire i dati dall'ARPA è quello di avere i dati a disposizione ricavati da una stazione meteorologica certificata e che mette a disposizione sul suo sito i monitoraggi dei dati meteo con scadenza oraria.

Nello specifico il file che si ottiene è un file testo (\*.txt) in cui la struttura dei dati è la seguente: data e ora, direzione del vento, velocità del vento, temperatura dell'aria, pressione atmosferica, umidità relativa, millimetri di pioggia e radiazione globale.

### 4.3.2. Input geometrici e impiantistici

La caratterizzazione dell'edificio con la stesura degli input geometrici e impiantistici, è realizzata con l'ausilio del software EnergyPlus.

Dopo aver compilato il programma in ogni parte necessaria, è stato prodotto un file \*.idf che descrive le caratteristiche geometriche (vedi Figura 4.9, in cui si visualizzano gli ambienti dell'edificio da simulare) e impiantistiche degli ambienti oggetto di monitoraggio. In particolare, i dati di input usati nella simulazione energetica sono i seguenti:



**Figura 4.9** Rappresentazione in Autocad degli ambienti oggetto del monitoraggio (file \*.idf).

### 4.3.3. Input monitoraggi

I monitoraggi eseguiti con i sensori wired producono un file testo (\*.txt) inviato ogni 5 minuti al server centrale. Con scadenza oraria il programma C++ si avvia automaticamente ed esegue la media dei valori in modo da avere a disposizione dei dati orari da poter utilizzare in accordo con i dati meteo, anch'essi orari.

La particolarità dei monitoraggi eseguiti sta nel fatto che le schede multisensore misurano tutte le medesime grandezze, ma la diversa disposizione all'interno degli ambienti (Figura 4.10) permette il monitoraggio di diversi fenomeni, tutti controllati dal programma realizzato:

- in prossimità degli elementi finestrati permette il monitoraggio della radiazione esterna entrante e della ventilazione dovuta all'apertura della finestra;
- in prossimità dei terminali d'impianto permette il controllo del funzionamento dei terminali;
- all'interno della stanza, in posizioni schermate consente il monitoraggio delle grandezze termoigrometriche inerenti al comfort.



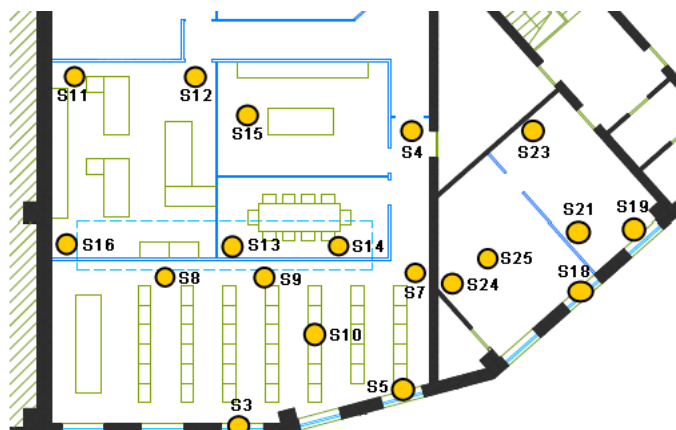


Figura 4.10 Posizionamento dei sensori della rete fissa negli ambienti monitorati.

#### 4.3.4. Architettura del programma di automatizzazione

Il programma realizzato in C++ è una delle parti essenziali del sistema wired in quanto permette il collegamento tra il sistema di monitoraggio dei dati da una parte e software di simulazione energetica dall'altra.

Come descritto precedentemente è stato sviluppato per automatizzare tutti quei processi che si dovevano eseguire ad intervalli stabiliti per rendere disponibili ogni ora i consumi e le previsioni future.

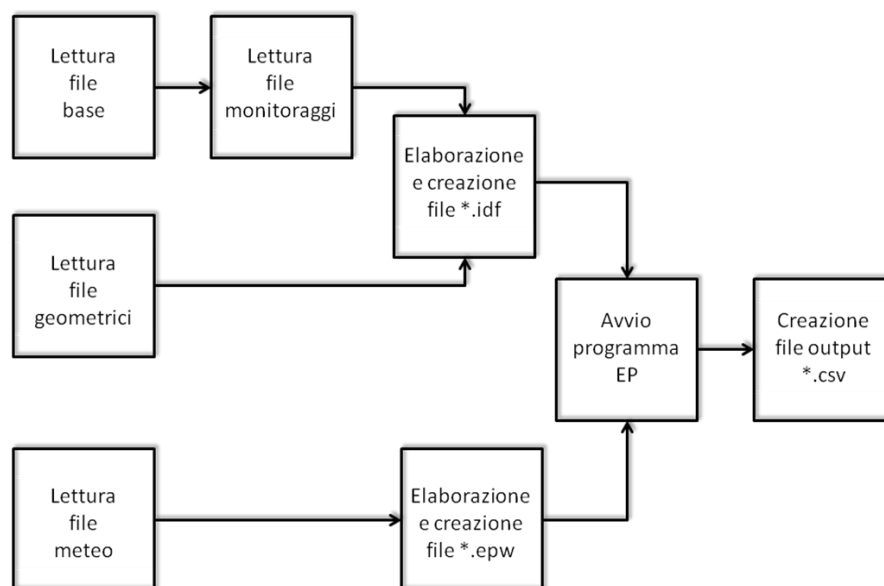


Figura 4.11 Schema dell'architettura generale del programma di automatizzazione.

Il programma sviluppato (rappresentato con diagramma a blocchi in Figura 4.11) prevede inizialmente la lettura di tutti i file input disponibili e successivamente l'elaborazione di quest'ultimi per creare i file di input necessari ad EnergyPlus (EP). Dopo l'avvio

automatizzato del programma di simulazione dinamica, si creano i file di output con i risultati richiesti, per essere visualizzati dai touch screen.

Dopo aver schematizzato l'architettura generale del programma di automatizzazione ci addentriamo nella trattazione più specifica della gestione dei file (Figura 4.12).

Si può notare come il diagramma a blocchi sia suddiviso in 3 aree in base alla tipologia di file da connettere: file di input da leggere (nella zona superiore), file da elaborare/gestire derivati dai file di input (nella parte centrale) e file di output dei risultati dopo l'avvio della simulazione energetica (nella zona inferiore).

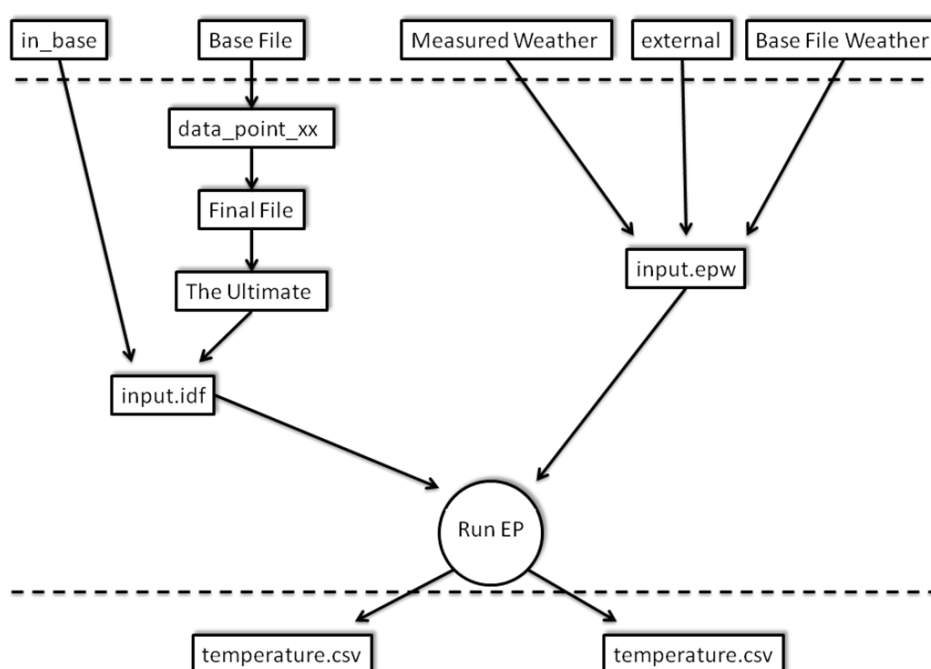


Figura 4.12 Schema concettuale del programma di automatizzazione realizzato in C++.

#### 4.3.4.1. Zona superiore

In riferimento alla Figura 4.12, sopra la prima linea tratteggiata, si trovano i file da gestire come input iniziali dal programma:

- *in\_base*, file \*.idf con le caratteristiche geometriche e impiantistiche dell'edificio considerato;
- *BaseFile*, file \*.txt con la lista dei path di altri file input, le coordinate geografiche necessarie per il calcolo della radiazione e la lista dei file dei monitoraggi;
- *MeasuredWeather*, file \*.txt con lo storico dei dati annuali fino all'ora precedente l'avvio della simulazione;
- *external*, file \*.txt con i valori meteo dell'ora in cui si esegue la simulazione;

- *BaseFileWeather*, file \*.txt con la struttura del file meteo necessario per la simulazione di EnergyPlus.

#### 4.3.4.2. Parte centrale

Nella zona centrale della Figura 4.12 si trovano i file da creare/gestire/elaborare dal programma di automatizzazione:

- *data\_point\_xx*, file \*.txt con i monitoraggi dei sensori ad intervalli di 5 minuti, vengono selezionati dal file Base File ed elaborati per la creazione del Final File;
- *Final File*, file \*.txt preparato eseguendo la media oraria dei monitoraggi derivati dal file *data\_point\_xx*;
- *The Ultimate*, file \*.txt elaborato dal Final File inserendo anche data e ora del monitoraggio;
- *input.idf*, file necessario per l'elaborazione con EP; il file *in\_base* con le caratteristiche geometriche e impiantistiche dell'edificio viene completato con i dati dei monitoraggi;
- *input.epw*, file necessario per l'elaborazione con EnergyPlus con i dati meteorologici del sito in cui è l'edificio; è creato partendo dal BaseFileWeather (file standard meteo di EP) in cui si sostituiscono i valori relativi ai monitoraggi meteo dell'ARPAV;
- *run EP*, non è un file ma l'istruzione che automatizza l'avvio del programma dove i file in ingresso (*input.idf* e *input.epw*) descrivono tutte le variabili necessarie alla simulazione dinamica dell'edificio.

#### 4.3.4.3. Zona inferiore

La Figura 4.12 presenta, nella zona inferiore, sotto la seconda linea tratteggiata, i file di output creati per la visualizzazione dei risultati:

- *temperature.csv*, file output con l'ipotesi di simulazione con temperatura di set point impostata quindi calore necessario per soddisfare i requisiti;
- *heat.csv*, file output con l'ipotesi di simulazione con impianto spento (Q=0) quindi temperatura in libera evoluzione.

## 4.4. Simulazioni predittive

L'utilizzo del software di simulazione dinamica degli edifici, oltre ad essere usato per la valutazione dei consumi energetici nel momento in cui la simulazione è avviata (automaticamente ad intervalli orari), viene utilizzato per fare delle previsioni.

Nel Capitolo 3, è stata fatta una panoramica dei metodi di previsione più usati, dividendoli anche in base al periodo di simulazione e alla precisione che si vuole ottenere.

Il punto focale della previsione resta comunque: cosa si vuole prevedere? E per quanto tempo?

Nel progetto di tesi gli input che contribuiscono alla modellizzazione del sistema edificio-impianto-ambiente sono:

- input geometrici e impiantistici;
- input ambientali derivati dai monitoraggi;
- input meteorologici.

L'idea di base per affrontare il problema della previsione è stato quello di decidere quali grandezze prevedere; nel caso in esame, gli input geometrici e impiantistici sono fissati, gli input ambientali si prevede siano gli stessi (in quanto impostati dall'utente per essere in condizioni di comfort). Si potrà quindi intervenire nei soli input meteorologici.

Per quanto riguarda la durata della previsione si è deciso di estenderla alla giornata successiva, quindi dal momento dell'avvio della simulazione, per le 24 ore successive.

### 4.4.1. Metodologia di previsione del carico

#### 4.4.1.1. Previsione dati meteo

Si specifica di seguito come sono state definite le succitate condizioni climatiche probabili per il giorno successivo. L'assegnazione delle condizioni climatiche del giorno seguente parte dai dati a disposizione del software, sotto riportati:

- storia climatica rilevata fino al giorno stesso (file MeasuredWeather);
- file meteo di riferimento per la località (TRY, Test Reference Year).

Il software in C++ confronta il profilo della radiazione solare sul piano orizzontale e il profilo della temperatura esterna a bulbo secco delle ultime 36 ore rilevate e li confronta con i dati presenti nel TRY, giungendo così a identificare il giorno che somiglia maggiormente alle ultime rilevazioni meteorologiche. Il giorno seguente, trovato dai dati

storici meteorologici, viene quindi assunto quale giorno meteorologicamente più probabile (Allegato A).

I 24 valori orari predetti vengono quindi copiati nel file meteo dopo l'orario in cui viene lanciata la simulazione da EnergyPlus in modo da realizzare un file meteo con i dati storici e le previsioni.

La modalità di assegnazione descritta rientra nel campo dei metodi previsionali quantitativi a breve termine, la *media mobile semplice*.

Seppur semplificata, tale modalità di assegnazione dei dati risulta utilizzabile in seguito alla modalità stessa di costruzione dei TRY, riportata in UNI EN ISO 15927-4:2005, secondo cui il TRY deriva dalla concatenazione di 12 mesi effettivamente rilevati presso il sito.

In questa prima fase di sviluppo si è pensato di ricorrere a questo metodo al fine di evitare il ricorso all'interpretazione numerica di previsioni meteorologiche raccolte da siti web specialistici

#### 4.4.1.2. Implementazione delle previsioni in EnergyPlus

La previsione termo-energetica viene aggiornata ad ogni ora attraverso una nuova simulazione e si basa su condizioni al contorno controllate e adeguate in base alla recente evoluzione degli ambienti esterno e interno.

La simulazione in EnergyPlus si estende dal ventesimo giorno precedente l'ultimo giorno di misura al giorno successivo, dando così modo al software di raggiungere una distribuzione termica rappresentativa dell'effettivo stato termico delle superfici opache che circoscrivono gli ambienti confinati.

Il software EnergyPlus viene utilizzato per svolgere simulazioni predittive del sistema edificio-impianto assumendo le seguenti condizioni:

- temperature di setpoint all'interno degli ambienti costanti e pari all'ultimo valore rilevato;
- carichi interni pari a quelli rilevati nelle ore omologhe del giorno precedente;
- condizioni climatiche probabili per il giorno successivo.

#### **4.4.2. Modalità di previsioni effettuate**

Il software elaborato, oltre a provvedere all'automatizzazione della gestione dei file e alla definizione del periodo di previsione dei dati meteorologici, è utilizzato anche per avviare due diverse modalità di simulazione energetica (vedi Figura 4.8):

- modalità A: previsione dei carichi di riscaldamento/raffrescamento a temperature di setpoint costanti;
- modalità B: previsione della temperatura di deriva dell'ambiente interno, cioè della temperatura cui si porterebbe l'ambiente interno nel caso di spegnimento del sistema di riscaldamento/raffrescamento.

La selezione di una modalità rispetto all'altra avviene attraverso il file Control.outp, un file \*.txt in cui l'inserimento dei valori 0 e 1 (associati in EnergyPlus agli stati acceso/spento) attiva o disattiva l'entrata in funzione dell'impianto di riscaldamento e di raffrescamento in relazione alla stagione (Allegato B).

## Capitolo 5. Previsioni e potenzialità del sistema edificio-impianto

La rete di sensori sviluppata permette di eseguire il monitoraggio energetico e ambientale dell'edificio analizzato utilizzando le reti di sensori, cablate e wireless, installate.

Il valore aggiunto di tale sistema consiste comunque nell'utilizzare i monitoraggi eseguiti per realizzare una previsione dei consumi energetici nel giorno successivo e questo grazie all'uso di un software di simulazione dinamica degli edifici.

Nel capitolo seguente si illustrano le condizioni al contorno, la procedura di calcolo, i risultati sperimentali e la verifica realizzata per validare il sistema di sensori realizzato. Oltre a questo, la rete è anche utilizzata per altri scopi che ne aumentano le potenzialità.

La parte corpusca del sistema è la modellizzazione dell'edificio che deve essere fatta *ad hoc* per ogni caso studio ma, una volta realizzata, si può utilizzare per diverse analisi. Una su tutte, come nei casi esaminati, per eseguire audit energetici oppure per realizzare analisi degli impianti di climatizzazione, dopo aver constatato un discomfort interno da parte delle persone.

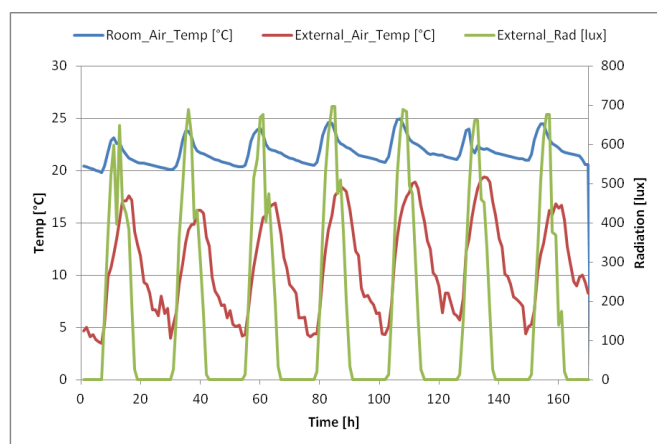
### 5.1. Verifica sperimentale della previsione del sistema edificio-impianto

La previsione del comportamento energetico dell'edificio in esame da parte del sistema di sensori installato deve essere valutato attentamente per verificarne la validità (Scarpa et al., 2012).

Nello studio eseguito ci si sofferma in particolare sulla verifica dell'effettiva correlazione tra il metodo di calcolo simulativo e le potenze termiche immesse realmente dall'impianto di riscaldamento asservito all'ambiente confinato. Si può così validare l'applicabilità di tale procedura di calcolo.

### 5.1.1. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno definite nello studio sono le medesime considerate nelle sezioni precedenti, in particolare gli input geometrici e impiantistici sono necessariamente uguali mentre, per quanto riguarda gli input meteo e di monitoraggio, sono riferiti al periodo di analisi considerato.



**Figura 5.1** Principali condizioni al contorno per la simulazione nel periodo esaminato.

Nella Figura 5.1 sono diagrammate le condizioni climatiche esterne (specificamente la radiazione solare su piano orizzontale e la temperatura a bulbo secco dell'aria) per il periodo in esame (una settimana nel mese di novembre 2011), rese disponibili in tempo reale da siti meteorologici online e la temperatura dell'aria rilevata all'interno dell'ambiente.

Tali valori costituiscono parte delle condizioni al contorno per le simulazioni predittive svolte mediante software EnergyPlus. Essi servono a ricostruire la storia termica dell'edificio, rendendo così i profili termici all'interno delle strutture edilizie il più possibile aderenti a quelli reali.

### 5.1.2. Procedura di calcolo

Come precedentemente spiegato, il software EnergyPlus (DOE, 2010) viene utilizzato per svolgere simulazioni predittive del sistema edificio-impianto assumendo le seguenti condizioni:

- temperature di setpoint all'interno degli ambienti costanti e pari all'ultimo valore rilevato;
- carichi interni pari a quelli rilevati nelle ore omologhe del giorno precedente;



- condizioni climatiche previste per il giorno successivo (con il metodo di calcolo definito al paragrafo 4.4.1.1).

La previsione termo-energetica viene aggiornata ad ogni ora, attraverso una nuova simulazione e si basa su condizioni al contorno aggiornate in base alla recente evoluzione degli ambienti esterno e interno.

La procedura di calcolo consente l'elaborazione delle previsioni in modalità A e in modalità B per ciascuna stanza, come riportato in Figura 5.1 a livello esemplificativo.

Di seguito si restituiranno i risultati raccolti nella sala conferenze, in quanto risultata l'ambiente con il maggior numero di variabili da monitorare essendo dotata di elementi finestrati confinanti con l'esterno e di due fan coil.

### **5.1.3. Risultati previsionali**

I risultati della simulazione con il software EnergyPlus sono evidenziati in Figura 5.2.

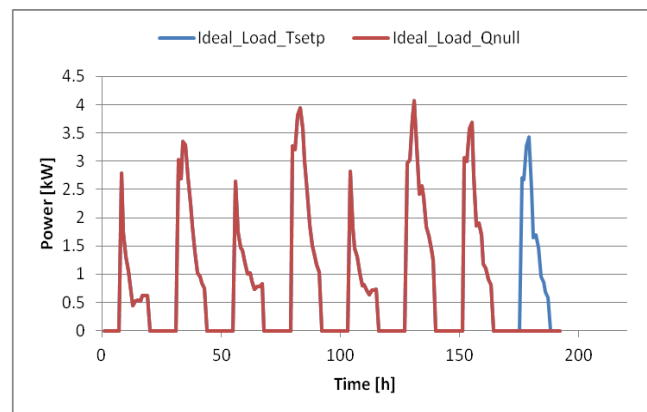
Le due modalità di previsione vengono rappresentate nello stesso grafico:

- modalità con temperatura di setup impostata, in colore blu;
- modalità con impianto spento ed evoluzione libera della temperatura, in colore rosso.

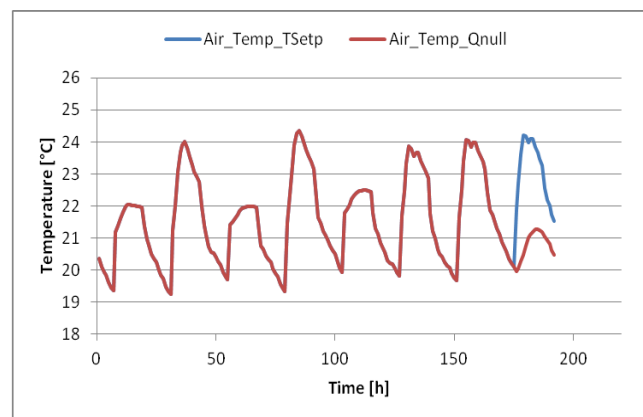
Le due modalità di funzionamento sono identiche prima della previsione in quanto la simulazione prevede il monitoraggio delle temperature (Figura 5.2.b.) e il relativo consumo energetico (Figura 5.2.a.) con impianto di riscaldamento acceso. In questo periodo si constata un funzionamento dell'impianto di riscaldamento nella norma, nella settimana di monitoraggio: durante le ore giornaliere l'impianto resta acceso per soddisfare la richiesta energetica mentre di notte è spento e di conseguenza l'andamento delle temperature è anch'esso altalenante per l'accensione/spengimento dell'impianto.

Si nota che l'impianto per soddisfare alla richiesta di temperature interne che variano tra i 22°C e i 24°C deve sopperire con una potenza tra i 2,8 kW e i 4 kW.

Il punto in cui linea rossa e linea blu si suddividono coincide con il momento in cui inizia la modalità "previsione".



a)



b)

**Figura 5.2 Andamenti nel periodo considerato: a) Carichi termici previsti a temperatura di setpoint costante; b) Temperatura interna prevista in regime libero.**

Nella modalità in evoluzione libera, con impianto spento (linea rossa) si nota come la potenza richiesta sia uguale a zero e di conseguenza le temperature siano inferiori rispetto ai giorni precedenti. In questo caso l'andamento ha un massimo di circa  $21^{\circ}\text{C}$  in corrispondenza delle ore 13 in cui c'è maggior apporto solare dagli elementi finestrati, per poi decrescere fino a circa  $20,5^{\circ}\text{C}$ .

Nella modalità con temperatura impostata, con impianto acceso (linea blu) il comportamento sia della potenza che della temperatura è simile ai giorni precedenti. In questo caso la potenza con impianto di riscaldamento acceso arriva a  $3,5\text{ kW}$  assicurando una temperatura interna di  $24^{\circ}\text{C}$ , per poi decrescere fino a circa  $21,5^{\circ}\text{C}$  nella notte.

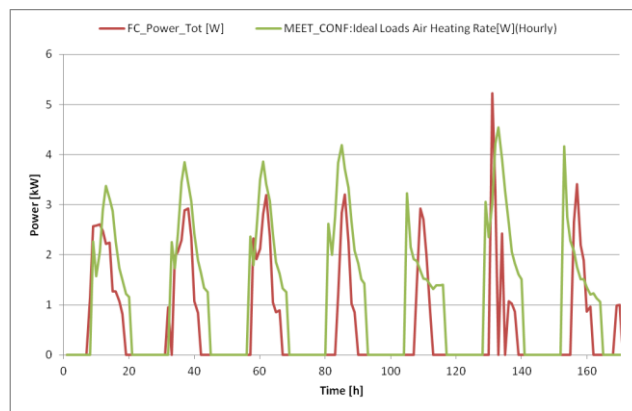
#### 5.1.4. Verifica previsioni

Dopo aver eseguito la simulazione con conseguente predizione dei carichi e delle temperature, ci si pone il problema di verificare la veridicità di tali previsioni. Si sono

dunque confrontati i risultati delle simulazioni svolte con EnergyPlus rispetto alla potenza espressa dai ventilconvettori.

Il valore della potenza è stato calcolato a partire dai seguenti parametri di misura:

- temperatura rilevata con sensore posizionato sull'emissione del ventilconvettore;
- temperatura rilevata dal sensore ambientale rappresentativo del nodo aria dell'ambiente confinato;
- portata volumetrica dei fan coil, tratta dai relativi cataloghi per la velocità impostata (e non modificata da parte degli utenti, avvisati in merito).



**Figura 5.3** Confronto tra le potenze termiche totali reale e prevista dell'impianto di riscaldamento.

Nel grafico di Figura 5.3 vengono visualizzati gli andamenti delle potenze termiche per i fan coil asserviti alla stanza:

- reali, rappresentate con linea rossa, con riferimento a 7 giorni di misura;
- calcolate, in linea verde, con riferimento ai 6 giorni antecedenti al giorno di previsione e previste nell'ultimo giorno del periodo.

### 5.1.5. Discussione

Dal confronto dei dati calcolati e misurati si nota che i valori delle potenze termiche previste siano per la maggior parte delle giornate prossimi alle potenze termiche misurate. Questo fornisce una prima conferma dell'opportunità di affidarsi alla procedura sviluppata per la descrizione termoenergetica dell'edificio tramite cui procedere successivamente alla previsione a breve termine dei parametri termo energetici dell'edificio stesso.

Le ipotesi accreditate su cui basarsi per migliorare la modellizzazione con il software dinamico e, di conseguenza, le previsioni effettuate, potrebbero essere:

- condizioni al contorno: i risultati sono molto dipendenti dai parametri di input inseriti (Burke et al., 2005);
- il comportamento degli occupanti, i soggetti che vivono all'interno degli ambienti interferiscono spesso con le condizioni al contorno impostate in quanto possono interagire con le temperatura di setpoint, accensione apparecchi elettrici, apertura finestre (Doodoo et al., 2011; Rajal et al., 2007; Nguyen al., 2013; Page et al., 2008; WBCSD, 2009);
- il numero degli occupanti, oltre al loro comportamento all'interno dell'ambiente è indispensabile considerare anche il loro numero, ma anche in questo caso le ipotesi da considerare sono molteplici (Fabi et al., 2011; Branco et al., 2004; Emery et al., 2006).

Come si può constatare dalla letteratura, l'influenza degli occupanti (sia considerato il numero che il comportamento) è il problema principale della modellizzazione dinamica degli edifici. Se si considera che le nuove costruzioni devono sottostare a normative sempre più restringenti in ambito di consumi energetici si può apprezzare come la presenza di carichi interni sia sempre più influente.

Dalla Figura 5.3 si nota infatti che l'andamento temporale della previsione è in linea con quello dei monitoraggi ma lo stesso non si può dire del valore assoluto. Questo è sicuramente dipeso dagli input sui carichi interni. L'ambiente modellizzato è una sala riunioni in cui il numero dei soggetti presenti non è costante e quindi le condizioni al contorno sono sicuramente da migliorare ed affinare.

## **5.2. Potenzialità della rete di sensori**

Lo progettazione della rete di sensori di monitoraggio ha previsto la modellizzazione dell'edificio testbed, utilizzando il software di simulazione dinamica EP, e, servendosi di tutti i dati input a disposizione. Si è pensato dunque, di sviluppare un modello fisico per la previsione dei consumi.

Servendosi del modello già realizzato in EP, si è ritenuto utile di utilizzarlo per aumentare le potenzialità del sistema di monitoraggio in particolare, utilizzarlo per svolgere un audit energetico della zona adibita a sala conferenze e uno stato dell'arte degli impianti di climatizzazione presenti nell'edificio.

### 5.2.1. Audit energetico

Il processo di audit energetico viene sviluppato con l'obiettivo di capire come l'energia viene utilizzata, quali sono gli sprechi e quali sarebbero gli interventi necessari per limitare le perdite.

L'analisi oggetto del presente paragrafo, eseguita nell'edificio monitorato, utilizza il modello già sviluppato per considerare delle possibili migliorie da apportare alla struttura.

#### 5.2.1.1. Periodo 26 febbraio-18 marzo 2012

Si considerano le condizioni al contorno, definite dal periodo di simulazione, che comprendono i valori termoigrometrici esterni e interni ricavati dal sito dell'ARPAV e i monitoraggi eseguiti:

- $t_{\text{ext media}} = 10,4^{\circ}\text{C}$
- $U_{\text{r ext media}} = 48,9\%$
- $t_{\text{int media}} = 20,9^{\circ}\text{C}$
- $U_{\text{r int media}} = 45,3\%$

I consumi energetici in riscaldamento, nella situazione attuale, senza alcun intervento considerato, risultano:

| $U_{\text{finestra}}$ | SHGC | $U_{\text{parete}}$ | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> |
|-----------------------|------|---------------------|---------------|--------------------|
| 2,75                  | 0,75 | 0,78                | 896           | 16                 |

Si propone il cambio degli infissi e la posa del cappotto esterno. I risultati sono elencati nelle tabelle sottostanti (e le variazioni percentuali riferite al caso iniziale):

Tabella 5.1, considera l'ipotesi di cambio degli infissi;

Tabella 5.2, è indicato il consumo con posa del cappotto esterno;

- Tabella 5.3, considera l'intersezione delle due migliori precedenti soluzioni: infisso altamente performante e cappotto in legno.

**Tabella 5.1 Audit energetico con cambio infissi nel periodo febbraio-marzo.**

| $U_{\text{finestra}}$ | SHGC | $U_{\text{parete}}$ | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> | Variazione % |
|-----------------------|------|---------------------|---------------|--------------------|--------------|
| 1,80                  | 0,65 | 0,78                | 945           | 17                 | +5           |
| 1,20                  | 0,50 | 0,78                | 1171          | 21                 | +24          |

**Tabella 5.2 Audit energetico con posa cappotto nel periodo febbraio-marzo.**

| Tipologia cappotto | $U_{\text{parete}}$ | C    | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> | Variazione % |
|--------------------|---------------------|------|---------------|--------------------|--------------|
| XPS                | 0,45                | 1200 | 750           | 13                 | -19          |
| Legno              | 0,40                | 2400 | 766           | 13                 | -17          |

**Tabella 5.3 Audit energetico con cambio infissi e posa cappotto nel periodo febbraio-marzo.**

| $U_{\text{finestra}}$ | SHGC | $U_{\text{parete}}$ | C    | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> | Variazione % |
|-----------------------|------|---------------------|------|---------------|--------------------|--------------|
| 1,20                  | 0,50 | 0,40                | 2400 | 1037          | 18                 | +14          |

### 5.2.1.2. Periodo 14 luglio-3 agosto 2012

Come per il periodo precedente si considerano le condizioni al contorno, cioè i dati ambientali esterni ed interni nel periodo considerato:

- $t_{\text{ext media}} = 24,8^{\circ}\text{C}$
- $U_{\text{r ext media}} = 59,4\%$
- $t_{\text{int media}} = 29,4^{\circ}\text{C}$
- $U_{\text{r int media}} = 57,4\%$

I consumi energetici in raffrescamento, nella situazione attuale, senza alcun intervento considerato, risultano:

| $U_{\text{finestra}}$ | SHGC | $U_{\text{parete}}$ | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> |
|-----------------------|------|---------------------|---------------|--------------------|
| 2,75                  | 0,75 | 0,78                | 1103          | 19                 |

Anche in questo periodo di simulazione, si propone il cambio degli infissi e la posa del cappotto esterno. I risultati sono visualizzati:

Tabella 5.4, ipotesi di cambio degli infissi;

Tabella 5.5, posa del cappotto esterno;

- Tabella 5.6, infisso altamente performante e cappotto in legno.

**Tabella 5.4 Audit energetico con cambio infissi nel periodo luglio agosto.**

| $U_{\text{finestra}}$ | SHGC | $U_{\text{parete}}$ | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> | Variazione % |
|-----------------------|------|---------------------|---------------|--------------------|--------------|
| 1,80                  | 0,65 | 0,78                | 965           | 17                 | -14          |
| 1,20                  | 0,50 | 0,78                | 708           | 12                 | -56          |

**Tabella 5.5 Audit energetico con posa cappotto nel periodo luglio-agosto.**

| Tipologia cappotto | $U_{\text{parete}}$ | C    | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> | Variazione % |
|--------------------|---------------------|------|---------------|--------------------|--------------|
| XPS                | 0,45                | 1200 | 965           | 17                 | -14          |
| Legno              | 0,40                | 2400 | 1147          | 20                 | +4           |

**Tabella 5.6 Audit energetico con cambio infissi e posa cappotto nel periodo luglio-agosto.**

| $U_{\text{finestra}}$ | SHGC | $U_{\text{parete}}$ | C    | Consumo (kWh) | kWh/m <sup>2</sup> | Variazione % |
|-----------------------|------|---------------------|------|---------------|--------------------|--------------|
| 1,20                  | 0,50 | 0,40                | 2400 | 799           | 14                 | -38          |

### 5.2.2. Stato dell'arte degli impianti di climatizzazione

Il monitoraggio degli ambienti interessati nell'edificio, associati ad uno stato generale di insoddisfazione dei soggetti ha portato a definire uno stato dell'arte degli impianti di climatizzazione del testbed.

Lo scopo di tale analisi è quella di elaborare un checkup delle possibili problematiche a livello impiantistico in modo da considerare, in un prossimo futuro, anche queste ultime in un'ottica generale di risparmio energetico di tutta la struttura.

Il complesso di edifici adibiti ad uso di laboratorio e uffici è suddiviso in 3 zone:

- C1, zona a sua volta ripartito in:
  - piano terra (C1PT): zona adibita a reception, zona server, laboratorio di chimica, bagni e spogliatoio;
  - piano primo (C1PP): zona adibita a uffici, sala conferenze e laboratorio di microbiologia;
- C2, zona adibita a magazzino e camere acustiche;
- C3, zona adibita a laboratorio di geotecnica.

Di seguito si presenta lo stato dell'arte in base ai diversi sistemi di approvvigionamento dell'energia e ai diversi tipi di terminali installati.

#### 5.2.2.1. Sistemi di approvvigionamento dell'energia

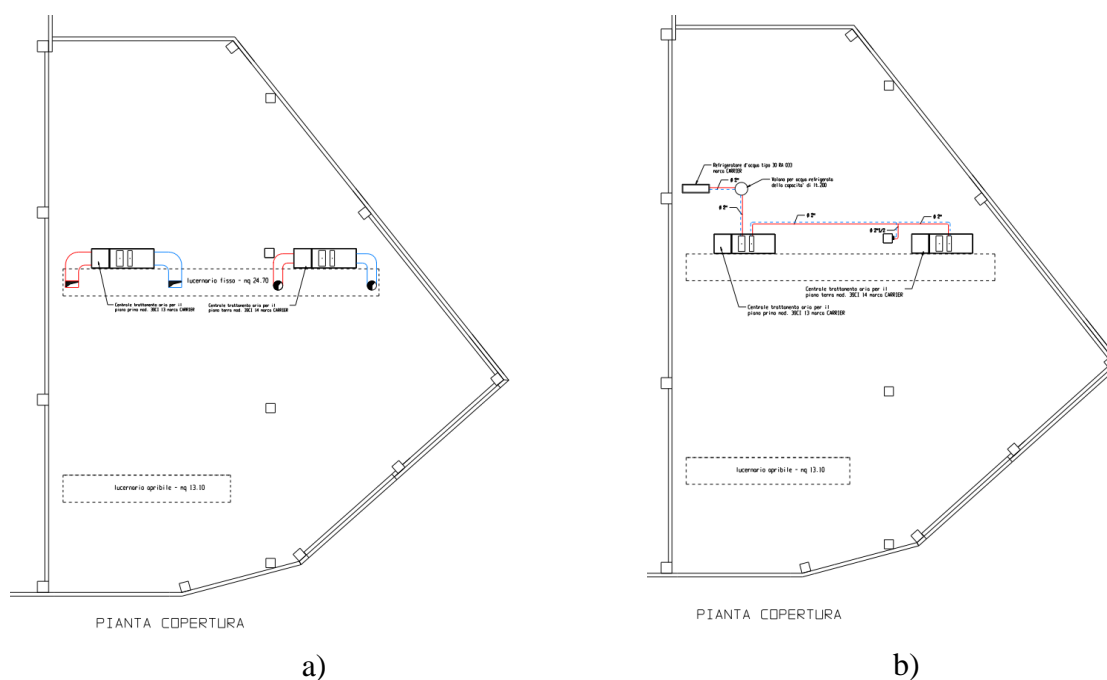
Nel settore C1 i sistemi di approvvigionamento dell'energia sono di diverse tipologie in base alle scelte strategiche aziendali per assicurare il comfort. Il settore C2 è un ambiente adibito a magazzino e quindi senza impianti di climatizzazione, mentre il settore C3 ha un impianto a nastro radiante in quanto i volumi da scaldare sono elevati.

### Unità di trattamento aria

Le unità di trattamento aria, una per piano, sono installate sul tetto del capannone (Figura 5.4.a) e usate per inviare l'aria nel circuito aeraulico di aria primaria in C1PT (laboratorio di chimica) e in C1PP (laboratorio di microbiologia, sala conferenze e uffici), in accoppiata con il chiller, in raffrescamento e la caldaia, in riscaldamento.

**Tabella 5.7** Caratteristiche tecniche unità di trattamento dell'aria.

| Ventilatore mandata         |      |      | Batteria preriscaldamento |      |      | Batteria raffreddamento |       |       |
|-----------------------------|------|------|---------------------------|------|------|-------------------------|-------|-------|
| Portata (m <sup>3</sup> /h) | 8500 | 7500 | Perdite (Pa)              | 20   | 20   | Perdite (Pa)            | 150   | 160   |
| Hs utile (Pa)               | 250  | 250  | Potenza (kW)              | 85   | 70   | Potenza (kW)            | 65    | 56    |
| Hs totale (Pa)              | 750  | 750  | Portata (l/h)             | 8000 | 6500 | Portata (l/h)           | 11500 | 10000 |
|                             |      |      | Numero                    | 7    | 12   | Numero                  | 14    | 16    |



**Figura 5.4** Schema del posizionamento a) dell'UTA e b) del chiller sulla copertura dell'edificio.

### Chiller

Il gruppo di refrigerazione (Figura 5.4.b) è usato:

- per il raffreddamento dell'aria primaria che poi verrà inviato all'UTA per essere distribuito nel circuito aeraulico (C1PT e C1PP);
- direttamente per essere inviato nel fan coil del C1PP (sala conferenze).



**Tabella 5.8 Caratteristiche tecniche chiller.**

| Capacità frigorifera netta = 31,7 kW |                |   |                                      |
|--------------------------------------|----------------|---|--------------------------------------|
| Compressore                          | Evaporatore    | Condensatore  | Ventilatori                          |
| 1<br>ermetico di tipo Scroll         | 1<br>a piastre | 1<br>con tubi in rame e<br>pacco alettato alluminio | 2<br>di tipo assiale<br>a 2 velocità |

*Centrale termica*

Completa di caldaia e bruciatore, serve per il riscaldamento dei:

- radiatori in C1PT (uffici, zona spogliatoi e bagni) e C1PP (uffici);
- fan coil in C1PP (sala conferenze);
- aria primaria in C1PT e C1PP (dopo essere passata per l'UTA).

Si riportano in dettaglio le caratteristiche tecniche della macchina in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

**Tabella 5.9 Caratteristiche tecniche centrale termica.**

| Combustibile              | GPL      |
|---------------------------|----------|
| Pot. Termica focolare max | 166,0 kW |
| Pot. Termica focolare min | 116,0 kW |
| Pot. Termica utile max    | 152,9 kW |
| Pot. Termica utile min    | 107,4 kW |

*Condizionatori*

Sono macchine indipendenti, associate agli split installati negli uffici nell'edificio, contribuiscono al raffrescamento del C1PT (uffici) e C1PP (uffici).

**Tabella 5.10 Caratteristiche tecniche condizionatori.**

|                          |        |        |
|--------------------------|--------|--------|
| Assorb. Elettrico max    | 1630 W | 3170 W |
| Temp. max esercizio int. | 32°C   | 32°C   |
| Temp. max esercizio est. | 43°C   | 43°C   |
| Temp. min esercizio int. | 21°C   | 21°C   |
| Temp. min esercizio est. | 15°C   | 15°C   |

*Bruciatore nastro radiante*

Il sistema a nastro radiante installato nel settore C3 funziona con i fumi inviati da un bruciatore nei tubi installati a soffitto che, per radiazione, riscaldano l'ambiente.

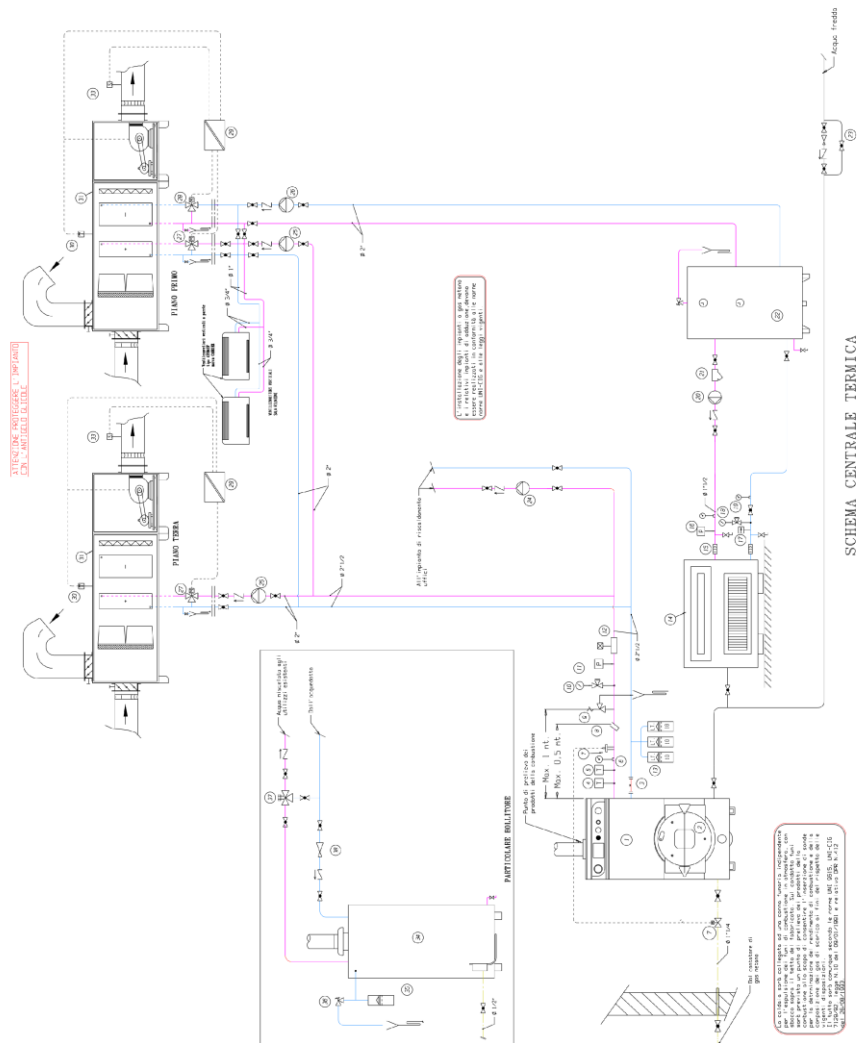
**Tabella 5.11 Caratteristiche tecniche bruciatore nastro radiante.**

|                           |                               |
|---------------------------|-------------------------------|
| Tipologia                 | Generatore a 2 stadi standard |
| Combustibile              | Gas metano                    |
| Pot. Termica focolare max | 115,0 kW                      |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Pot. Termica focolare min | 80,0 kW |
| Diametro nastri radianti  | 300 mm  |

*Impianto completo C1*

Di seguito si riporta lo schema generale dei collegamenti tra UTA, chiller e caldaia per il riscaldamento e raffreddamento di tutti gli impianti centralizzati ad acqua ed ad aria (Figura 5.5).



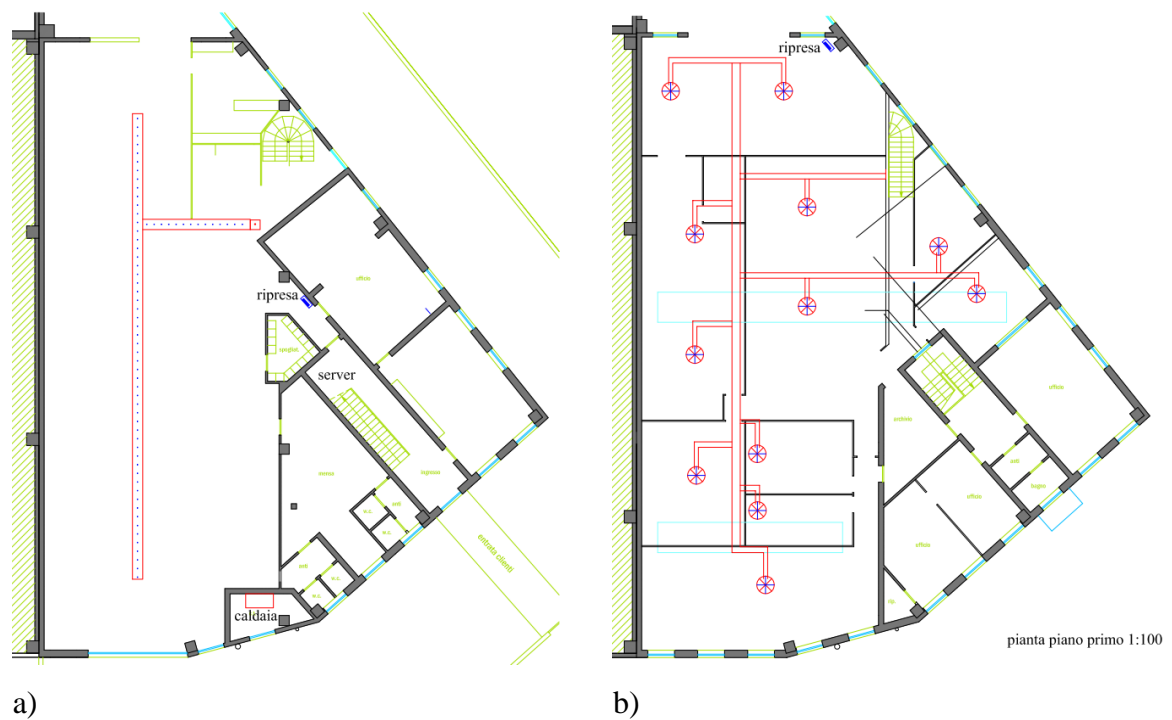
**Figura 5.5** Schema generale dei collegamenti con UTA, chiller e centrale termica.

### 5.2.2.2. Terminali d'impianto

Definiti i sistemi di approvvigionamento dell'energia, si definiscono i terminali d'impianto adatti alle esigenze.

#### *Canalizzazione gonfiabile nel CIPT*

Tale sistema schematizzato in Figura 5.6.a., funzionante con l'aria primaria derivata dall'UTA, è in funzione sia in riscaldamento (quindi associato anche alla caldaia) e sia in raffrescamento (associato al chiller).



**Figura 5.6** Schema di posizionamento a) dell'impianto ad aria con canalizzazione gonfiabile in CIPT e b) dell'impianto ad aria con diffusori in CIPP.

#### *Impianto aeraulico con diffusori nel CIPP*

Impianto costituito da canali in lamiera zincata che servono i vari ambienti C1PP. L'aria primaria viene distribuita attraverso i bocchettoni sistemati come in Figura 5.6.b..

#### *Radiatori*

Questo tipo di terminale è funzionante solo con l'acqua di mandata della caldaia, quindi utilizzato solo in condizioni invernali.

### *Fan coil*

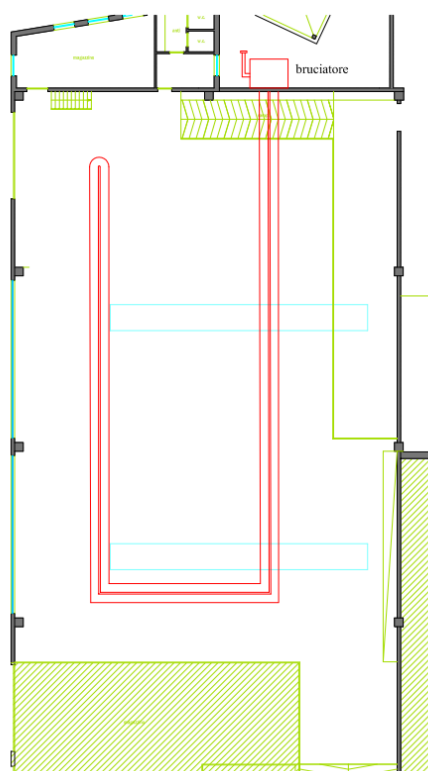
Per come sono progettati questi terminali, assicurano sia il riscaldamento che il raffrescamento, in base alla stagione. Sono collegati direttamente alla caldaia e al gruppo frigo.

### *Unità interna condizionatore*

I terminali sono collegati a dei condizionatori indipendenti dal resto del sistema di refrigerazione centralizzato. Assicurano il raffrescamento solo ad una parte ristretta dell'edificio (in particolare gli uffici sia al C1PT che al C1PP).

### *Nastro radiante*

L'unico sistema di comfort nel settore C3 che prevede il solo riscaldamento associato al bruciatore è il sistema di tubazioni a nastro radiante (Figura 5.7).



**Figura 5.7** Schema di posizionamento dell'impianto a nastro radiante in C3.

## Capitolo 6. Conclusioni

Il progetto di dottorato si pone l'obiettivo di studiare e valutare un sistema di monitoraggio atto all'acquisizione dei parametri energetici di ambienti indoor e di sviluppare, inoltre, una procedura "real time" per la conseguente rielaborazione dei dati raccolti finalizzata quest'ultima all'analisi energetica dell'edificio.

L'utilizzo del monitoraggio per la rilevazione dei consumi energetici degli edifici ha una efficacia evidente per rilevare i reali consumi e per valutare se l'uso delle reti di sensori, siano esse cablate o wireless, integrate con altri sistemi presenti nell'edificio possano aumentarne le potenzialità.

La tecnologia dei sensori nel campo dell'energetica degli edifici si sta evolvendo verso la tipologia BMS (Building Management Systems) e cioè verso sistemi automatizzati il cui scopo è quello di ottimizzare i bilanciamenti tra condizioni ambientali, uso dell'energia e condizioni operative. Tale funzione viene attuata attraverso l'esecuzione di un monitoraggio ambientale e di un controllo degli impianti di climatizzazione e ventilazione, così da prevederne una loro interazione finalizzata alla efficienza ed alla economicità energetica dell'intero edificio.

Il sistema ideato, nell'ottica futura di realizzazione di una rete BMS che prevede anche l'automatizzazione degli impianti, ha tracciato la strada per sviluppare una piattaforma hardware e software di tipo free. Infatti, sia i sensori installati nei *mote* che il programma scritto in linguaggio C++ hanno permesso il libero sviluppo della rete progettata. Così facendo, l'installazione e l'implementazione del sistema stesso può avvenire in maniera indipendente rispetto alle condizioni di mercato e alle logiche di funzionamento dei sensori commercializzati.

Considerando la certificazione energetica degli edifici, sviluppata a partire dalla Direttiva Europea EPBD 2002/91/CE, è possibile affermare che, la tendenza attuale è quella di utilizzare software di tipo dinamico per la certificazione di tipo standard poiché sono gli unici software che riescono, con buon dettaglio, a fornire una valutazione energetica in

condizioni di funzionamento estive. Quest'ultima considerazione supporta gli obiettivi del sistema di sensori sviluppato in cui la parte software e di modellizzazione avvengono per mezzo del programma EnergyPlus. Quest'ultimo software è stato validato a livello internazionale e, associato alle reti di sensori, permette non solo il monitoraggio dei parametri termoigrometrici indoor ma anche la previsione dei consumi energetici.

Dai risultati presentati si evince la validità della proposta, in cui la simulazione dell'edificio a partire da dati di monitoraggio si rivela in prima analisi praticabile anche se, sicuramente, affinabile. L'analisi ha verificato in maniera soddisfacente la previsione temporale dei carichi termici, anche se non completamente in termini assoluti. La causa di questa parziale inefficienza va ricercata nella difficoltà di prevedere e valutare con dettaglio i carichi interni in un impianto modellato non ai fini del monitoraggio come nel caso studio affrontato.

È per questo motivo che gli interventi che si suppone siano necessari per migliorare le previsioni siano:

- monitoraggio più raffinato e dettagliato dei carichi termici interni, in quanto sempre più influenti in edifici energeticamente efficienti;
- migliore monitoraggio del funzionamento dei terminali d'impianto, per esempio utilizzando sensori di temperatura anche nei pressi delle bocchette di ripresa dei fan coil.

Il sicuro vantaggio del sistema è stato apprezzato nel momento in cui è stata eseguita la modellizzazione dinamica del sistema edificio-impianto. Infatti, in questo caso, oltre ad essere stata utilizzata la modellizzazione dinamica in modalità "integrata" all'interno della rete di sensori progettata per eseguire le previsioni, la stessa potrebbe venire anche impiegata esternamente al sistema per realizzare degli audit e/o una manutenzione degli impianti e ampliare, in questo modo, le potenzialità della stessa.

---

## Bibliografia

### Articoli all'interno di rivista

- Aguiar R., Oliveira M., Goncalves H., *Climate change impacts on the thermal performance of Portuguese buildings. Results of the SIAM study*, Building Services Engineering Research and Technology, 23(4)(2002), pp. 223-231.
- Amjady N., *Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability*, IEEE Transactions on Power Systems, 16(3)(2001), pp. 498-555.
- Audenaert A., Briffaerts K., Engels L., *Practical versus theoretical domestic energy consumption for space heating*, Energy Policy, 39(2011), pp. 5219-5227.
- Ballarini I., Corrado V., *Application of energy rating methods to the existing building stock: analysis of some residential buildings in Turin*, Energy and Buildings, 41(2009), pp. 790-800.
- Bonarini A., *Sistemi fuzzy*, Mondo digitale, 1(2003), pp. 3-14.
- Brager G.S., de Dear R.J., *Thermal adaptation in the built environment: a literature review*, Energy and Buildings, 27(1)(1998), pp. 83-96.
- Branco G., Lachal B., Gallinelli P., Weber W., *Predicted versus observed heat consumption of a low Energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data*, Energy and Buildings, 36(2004), pp. 543-555.
- Brown N., Wright A.J., Shikla A., Stuart G., *Longitudinal analysis of energy metering data from non-domestic buildings*, Building Research and Information, 38(1)(2010), pp. 80-91.
- Burge C.A., *Sick building syndrome*, Occupational and Environmental Medicine, 61(2004), pp. 185-190.
- Caldera M., Corgnati S.P., Filippi M., *Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings*, Energy and Buildings, 40(2008), pp. 1972-1983.

- Casari P., Castellani A.P., Cenedese A., Lora C., Rossi M., Schenato L., Zorzi M., *The “Wireless Sensor Networks for City-Wide Ambient Intelligence (WISE-WAI)” Project*, *Sensors*, 9(2009), pp. 4056-4082.
- Chen D., Wang X., Ren Z., *Selection of climatic variables and time scales for future weather preparation in building heating and cooling energy prediction*, *Energy and Buildings*, 51(2012), pp. 223-233.
- Dall’O’ G., Sarto L., Galante A., Pasetti G., *Comparison between predicted and actual Energy performance for winter heating in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy)*, *Energy and Buildings*, 47(2012), pp. 247-253.
- de Dear R.J., Brager G.S., *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55*, *Energy and Buildings*, 34(6)(2002), pp. 549-561.
- Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R., *Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective*, *Energy and Buildings*, 43(2011), pp. 1589-1597.
- Emery A.F., Kippenhan C.J., *A long term of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards*, *Energy* 31(2006), pp. 677-693.
- Fang L., Wyon D.P., Clausen G., Fanger P.O., *Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality*, *Indoor Air*, 14(7)(2004), pp. 74-81.
- Fanger P.O., *Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors*, *Energy and Buildings*, 12(1988), pp. 1-6.
- Fokaides P.A., Maxoulis C.N., Panayiotou G.P., Neophytou M.K.-A., Kalogirou S.A., *Comparison between measured and calculated energy performance for dwellings in a summer dominant environment*, *Energy and Buildings*, 43(2011), pp. 3099-3105.
- Guan L., *Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings*, *Buildings and Environment*, 44(2009), pp. 793-800.
- Gugliermetti F., Passerini G., Bisegna F., *Climate models for the assessment of office buildings energy performance*, *Building and Environment*, 39(2004), pp. 39-50.
- Haghighat F., Donnini G., *Impact of psycho-social factors on perception of the indoor air environment studies in 12 office buildings*, *Building and Environment*, 34(4)(1999), pp. 479-503.



- Healy W.M., *Lessons learned in wireless monitoring*, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, ASHRAE Journal, 47(10)(2005).
- Hernandez P., Burke K., Lewis O., *Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for no-domestic building, an example for Irish primary schools*, Energy and Buildings, 40 (2008), pp. 249-254.
- Kalogirou S.A., *Applications of artificial neural-networks for energy systems*, Applied Energy, 67(1-2)(2000), pp. 17-35.
- Kwak Y., Seo D., Jang C., Huh J., *Feasibility study on a novel methodology for short-term real-time energy demand prediction using weather forecasting data*, Energy and Buildings, 57(2013), pp. 250-260.
- Menzel K., Pesch D., O'Flynn B., Keane M., O'Mathuna C., *Towards a wireless sensor platform for energy efficient building operation*, Tsinghua Science and Technology, 13(2008), pp. 381-386.
- Neto A.H., Fiorelli F.A.S., *Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption*, Energy and Buildings, 40(2008), pp. 2169-2176.
- Nguyen T.A., Aiello M., *Energy intelligent buildings based on user activity: a survey*, Energy and Buildings, 56(2013), pp. 244-257.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*, Energy and Buildings, 34(6)(2002), pp. 563-572.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., *Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251*, Building and Environment, 45(1)(2010), pp. 11-17.
- Page J., Robinson D., Morel N., Scartezzini J.L., *A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence*, Energy and Buildings, 40(2)(2008), pp. 83-98.
- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C., *A review on buildings energy consumption information*, Energy and Buildings 40(3)(2008), pp. 394-398.
- Rijal H.B., Tuohy P., Humphreys M.A., Nicol J.F., Samuel A., Clarke J., *Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings*, Energy and Buildings, 39(2007), pp. 823-836.

- Tronchin L., Fabbri K., *Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: comparison between software simulation and operating rating simulation*, Energy and Buildings, 40(2008), pp. 1176-1187.
- van der Linden A.C., Boerstra A.C., Raue A.K., Kurvers S.R., de Dear R.J., *Adaptive temperature limits: a new guideline in the Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate*, Energy and Buildings, 38(1)(2006), pp. 8-17.
- Wargoocki P., Wyon D.P., Fanger P.O., *Productivity is affected by the air quality in offices*, Healthy Buildings, 1(2000), pp. 635-640.
- Wargoocki P., Wyon D.P., Baik Y.K., Clausen G., Fanger P.O., *Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads*, Indoor Air, 9(3)(2009), pp. 165-79.
- Wong L.T., Mui K.W., Hui P.S., *A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices*, Building and Environment, 43(1)(2008), pp. 1-6.
- Wong S.L., Wan K.K.W., Li D.H.W., Lam J.C., *Impact of climate change on residential building envelope cooling loads in subtropical climates*, Energy and Buildings, 42(2010), pp. 2098-2103.
- Wyon D.P., *The effects of indoor air quality (IAQ) on performance and productivity*, Indoor Air, 14(2004), pp. 92-101.
- Yezioro A., Dong B., Leitec F., *An applied artificial intelligence approach towards assessing building performance simulation tools*, Energy and Buildings, 40(2008), pp. 612-620.
- Zagreus L., Huizenga C., Arens E., Lehrer D., *Listening to the occupants: a web-based indoor environmental quality survey*, Indoor Air; 14(8)(2004), pp. 65-74.
- Zmeureanu R., Renaud G., *Estimation of potential impact of climate change on the heating energy use of existing houses*, Energy Policy, 36(2008), pp. 303-310.

## **Articoli all'interno di convegni**

- Antonucci D.F., Cadorin M., Zecchin R., *Monitorare il sistema edificio-impianto: metodologie e aspetti applicativi*, AICARR, 2012.
- Apte M.G., *A review of demand controlled ventilation*, Healthy Buildings, 2006.

- Baldassa P., De Carli M., Scarpa M., *Applicazione degli strumenti di calcolo per la diagnosi energetica degli edifici*, AICARR, 2009.
- Burke K., Kenny P., Finn D., *The transparency and repeatability of building energy performance certification*, Dynastee, 2005.
- Corgnati S.P., Filippi M., Cerutti A.A., Rollino L., *Energy performance of Italian existing residential buildings: results from asset and operation rating investigations*, EERB-BEPH (CHN), 2009.
- EIA, *Annual Energy Review 2010*, The World Business Council for Sustainable Development, 2011.
- Estrin D., Sayeed A., Srivastava M., *Tutorial "Wireless sensor networks"*, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- Fabi V., Andersen R.V., Corgnati S.P., Olesen B.W., Filippi M., *Description of occupant behaviour in building energy simulation: state-of-art and concepts for their improvement*, Building Simulation, 2011.
- Fabrizio E., Branciforti V., *Confronto tra asset rating e tailored rating nella riqualificazione energetica di una costruzione forestale in alta quota*, ATI, 2010.
- Grigg P., Slater A., *Assessment of energy efficiency impact of building regulations compliance report*, Energy Efficiency Partnership for Homes, 2004.
- Huizenga C., Laeser K., Arens E., *A web-based occupant satisfaction survey for benchmarking building quality*, Indoor Air, 2002.
- Milone A., Milone D., Pitruzzella S., *Asset rating: disagreement between the results obtained from software for energy certification*, IBPSA, 2009.
- Peretti C., Schiavon S., Goins J., Arens E., De Carli M., *Evaluation of indoor environment quality with a web-based occupant satisfaction survey: a case study in northern Italy*, Clima, 2010.
- Scarpa M., Pasqualetto M., De Carli M., *La previsione in tempo reale del comportamento del sistema edificio-impianto: verifica sperimentale*, AICARR, 2012.
- WBCSD, *Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings*, The World Business Council for Sustainable Development, 2009.

## Libri e tesi

- Amadio A., *Value Supply Flow. La strategia del flusso valore in un contest supply chain oriented*, Franco Angeli, ISBN 9788856847970, 2012, pp. 139-141.
- Beltrame M., *Sviluppo di una rete wireless di sensori per il monitoraggio di strutture in tempo reale*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Pavia, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Informatica, 2007/08.
- Bloem J.J. et al., *System identification applied to building performance data*, Joint Research Centre, European Commission, Brussels, (1994), pp. 234-236.
- Clarke J.A., *Energy Simulation in Building Design (2nd edition)*, Butterworth Heinemann, ISBN 978-0-7506-5082-3, 2001.
- Crepaldi R., *Algoritmi di localizzazione per reti di sensori: progettazione e realizzazione di una piattaforma sperimentale*, PhD thesis, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, 2006.
- DOE (U.S. Department of Energy), *Getting Started with EnergyPlus: Basic Concepts Manual-Essential Information You Need About Running EnergyPlus*, Berkeley National Laboratory, 2010.
- Ellis A.K., *Teaching and Learning Elementary Social Studies*, Prentice Hall College, Pearson, ISBN 0137039492, 2010, p. 43.
- Fanger P.O., *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- Hand J W., *Removing barriers to the use of simulation in the building design professions*, PhD Thesis, ESRU - University of Strathclyde in Glasgow, 1998.
- Landi S., *Progetto di servizi resource-aware per reti ad-hoc*, PhD thesis, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, 2004.
- LBNL (US DOE), *Getting Started with EnergyPlus*, Berkeley (CA), USA, 2011.
- Libro verde della Commissione delle Comunità Europee, *Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura*, Bruxelles, ISBN 92-79-00017-9, 2005.
- Michielan D., *Il processo di previsione della domanda*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica, 2002.
- Mills E., Friedman H., Powell T., Bourassa N., Claridge D., Haasl T., Piette M.A., *The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning: a meta-analysis of energy*

*and non-energy impacts in existing buildings and new construction in the United States*, Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. 56637, 2004.

United Nations Environment Programme, *Buildings and Climate Change Status, Challenges and Opportunities*, United Nations Environment Programme, Paris, ISBN 9789280727951, 2007.

VIM, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, second edition, Geneva, 1993.

## **Riferimenti normativi**

D.G. 31/10/2007 n.8/5773, *Certificazione energetica degli edifici*, modifiche ed integrazione alla Dgr n. 5018/2007.

Dgr 26/6/2007 n.8/5018, *Determinazioni inerenti la certificazione energetica degli edifici*, in attuazione del Dlgs 192/2005 e degli articoli 9 e 25 della I.R. 24/2006.

EN ISO 13790:2008, *Energy performance of building – calculation of energy use for space heating and cooling*.

I.R. 11/12/2006 n.24, *Norma per la prevenzione e la riduzione delle emissioni in atmosfera a tutela della salute e dell'ambiente*.

UNI 4546:1984, *Misure e misurazioni - Termini e definizioni fondamentali*.

UNI 10349:1994, *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici*.

UNI EN 15241:2008, *Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo delle perdite di energia dovute alla ventilazione e alle infiltrazioni negli edifici*.

UNI EN 15243:2008, *Ventilazione degli edifici - Calcolo delle temperature dei locali, del carico termico e dell'energia per edifici dotati di impianto di climatizzazione degli ambienti*.

UNI EN 15251:2007, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics*.

UNI EN 15316-4-8:2011, *Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-8: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, riscaldamento ad aria e sistemi di riscaldamento radianti*.

UNI EN 15603:2008, *Prestazione energetica degli edifici - Consumo energetico globale e definizione dei metodi di valutazione energetica.*

UNI EN ISO 7730:2006, *Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico.*

UNI EN ISO 9920: 2009, *Ergonomia dell'ambiente termico - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento.*

UNI EN ISO 15927-4:2005, *Prestazione termoigrometrica degli edifici-Calcolo e presentazione dei dati climatici - Parte 4: Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.*

UNI/TS 11300-1:2008, *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.*

## **Siti consultati**

ARPA Veneto,

[<http://www.arpa.veneto.it/bollettini/htm/dati\\_meteo.asp>.](http://www.arpa.veneto.it/bollettini/htm/dati_meteo.asp)

Caprioli C., *Analisi delle serie storiche: Strumenti econometrici utilizzati in finanza,*

[<http://classewiki.pbworks.com/w/file/51865868/Levine11.pdf>.](http://classewiki.pbworks.com/w/file/51865868/Levine11.pdf)

Cenedese A., *National research, SIMEA,*

[<http://automatica.dei.unipd.it/people/cenedese/research/simea.html>.](http://automatica.dei.unipd.it/people/cenedese/research/simea.html)

Giusti E., *Lezione di Ecologia Applicata, 2011,*

[<http://www.dsi.unifi.it/~giusti/Lezione\\_EcologiaApplicata/1bis\\_MODELLI\\_ely>.](http://www.dsi.unifi.it/~giusti/Lezione_EcologiaApplicata/1bis_MODELLI_ely)

Marsili S.L., *Analisi dei sistemi ambientali, 2010/11,*

[<http://dsii.dsi.unifi.it/~marsili/PPT/7\\_Modelli\\_Fuzzy.pdf>.](http://dsii.dsi.unifi.it/~marsili/PPT/7_Modelli_Fuzzy.pdf)

National Instruments Italia,

[<http://www.ni.com/white-paper/8939/it>.](http://www.ni.com/white-paper/8939/it)

Treccani.it, *L'enciclopedia Italiana,*

[<http://www.treccani.it>.](http://www.treccani.it)

Società per la divulgazione e produzione di energia pulita, *Provincia di Vicenza,*

[<http://www.vienergia.it/a\\_22\\_IT\\_70\\_1.html>.](http://www.vienergia.it/a_22_IT_70_1.html)

## Allegato A

```

float DaysToMonth[] = {0, 31, 59, 90, 120, 151, 181, 212, 243, 273, 304, 334, 360};
int FirstDayOfDaylightSavingTime = 84;
int LastDayOfDaylightSavingTime = 300;
int nHours_Forecast = 36;
int StartHourInYear;
StartHourInYear = 1 + int((DaysToMonth[Start_Month_Occupation - 1] + (Start_Day_Occupation
- 1)) * 24. + std::max(std::min(Start_Hour_Occupation, 24), 0) * 1. +
std::max(std::min(Start_Minutes_Occupation, 60), 0) / 60.);
.
.
.
int nHoursToBeCompared = 26;
for (int nDayInYear = 365 - int(nHoursToBeCompared / 24); nDayInYear >= 1; nDayInYear =
nDayInYear - 1) {
    Diff_Temp = 0.;
    Diff_Rad = 0.;
    nHourInYear = nDayInYear * 24 - (24 - ((EndHourInYear_Weath) % 24));
    nHour = 0;
    while ((nHourInYear > 0) && (nHour < nHoursToBeCompared)) {
        Diff_Temp = Diff_Temp + std::abs(WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_Temp -
WeatherData_Measured[EndHourInYear_Weath - nHour].Outd_Temp);
        Diff_Rad = Diff_Rad + std::abs(WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_TotRadH -
WeatherData_Measured[EndHourInYear_Weath - nHour].Outd_TotRadH);
        nHour = nHour + 1;
        nHourInYear = nHourInYear - 1;
    }
    if (Diff_Rad < Diff_Rad_Min) {
        if (Diff_Temp < Diff_Temp_Min * 1.1) {
            Diff_Temp_Min = Diff_Temp;
            Diff_Rad_Min = Diff_Rad;
            Diff_Min_nDay = nDayInYear;
        }
    }
}

int Delay_nDays = Diff_Min_nDay - (int((EndHourInYear_Weath) / 24.) + 1);
for (nHour = 0; nHour < nHours_Forecast; nHour = nHour + 1) {
    nHourInYear = EndHourInYear_Weath + nHour;
    WeatherData_Measured[nHourInYear].Outd_Temp = WeatherData_epw[nHourInYear + 24.
* Delay_nDays].Outd_Temp;

```

```

    WeatherData_Measured[nHourInYear].Outd_Temp_DP = WeatherData_epw[nHourInYear +
24. * Delay_nDays].Outd_Temp_DP;
    WeatherData_Measured[nHourInYear].Outd_RelHum = WeatherData_epw[nHourInYear +
24. * Delay_nDays].Outd_RelHum;
    WeatherData_Measured[nHourInYear].Outd_TotRadH = WeatherData_epw[nHourInYear +
24. * Delay_nDays].Outd_TotRadH;
    WeatherData_Measured[nHourInYear].Outd_DiffHorRad = WeatherData_epw[nHourInYear
+ 24. * Delay_nDays].Outd_DiffHorRad;
    WeatherData_Measured[nHourInYear].Outd_BeamNormRad =
WeatherData_epw[nHourInYear + 24. * Delay_nDays].Outd_BeamNormRad;
}
.
.
.
for (nHourInYear = 1; nHourInYear <= 8760; nHourInYear = nHourInYear + 1) {
    nHour = nHourInYear % 24;
    for (nltem = 0; nltem < 6; nltem = nltem + 1) {
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << Trash_String << ", ";
    }
    if ((nHourInYear < StartHourInYear_Weath) || (nHourInYear >= EndHourInYear_Weath +
nHours_Forecast)) {
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_Temp << ", ";
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_Temp_DP << ", ";
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_RelHum << ", ";
        for (nltem = 0; nltem < 4; nltem = nltem + 1) {
            getline(BaseFile, Trash_String, ',');
            FinalFile << Trash_String << ", ";
        }
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_TotRadH << ", ";
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_BeamNormRad << ", ";
        getline(BaseFile, Trash_String, ',');
        FinalFile << WeatherData_epw[nHourInYear].Outd_DiffHorRad << ", ";
        for (nltem = 0; nltem < 18; nltem = nltem + 1) {
            getline(BaseFile, Trash_String, ',');
            FinalFile << Trash_String << ", ";
        }
        getline(BaseFile, Trash_String, '\n');
        FinalFile << Trash_String << std::endl;
    }
}

```



## Allegato B

```

FinalFile.open("Control.OUTP", std::ofstream::out | std::ofstream::trunc);
for (nHourInYear = 1; nHourInYear <= 8760; nHourInYear = nHourInYear + 1) {
    if ((nHourInYear % 24 < 8) || (nHourInYear % 24 > 19)) {
        FinalFile << "0,0,1" << std::endl;
    } else {
        if ((nHourInYear <= 2520) || (nHourInYear >= 8760 - 1848)) {
            FinalFile << "1,0,1" << std::endl;
        } else {
            FinalFile << "0,1,1" << std::endl;
        }
    }
}
}
FinalFile.close();
FinalFile.clear();

BaseFile.close();
BaseFile.clear();

String_Supp = EPLUSFolder_Name + "bin/runenergyplus" + " " + EPLUSRunFolder_Name +
"input.idf input.epw";
system(String_Supp.c_str());

int Result = 0;
String_Supp = EPLUSRunFolder_Name + "Output/input.csv";
std::string OldName = String_Supp;

String_Supp = "/home/michele_pasqualetto/Scrivania/SCHEDULIZER/hours/temperature.csv";
std::string NewName = String_Supp;

Result = remove(NewName.c_str());
std::cout << "Result: " << Result << std::endl;
Result = rename(OldName.c_str(), NewName.c_str());
std::cout << "Result: " << Result << std::endl;
BaseFile.close();
BaseFile.clear();
FinalFile.close();
FinalFile.clear();

FinalFile.open("Control.OUTP", std::ofstream::out | std::ofstream::trunc);
for (nHourInYear = 1; nHourInYear <= 8760; nHourInYear = nHourInYear + 1) {

```

```
if (nHourInYear <= This_Label_Hour ) {
    if ((nHourInYear % 24 < 8) || (nHourInYear % 24 > 19)) {
        FinalFile << "0,0,1" << std::endl;
    } else {
        if ((nHourInYear <= 2520) || (nHourInYear >= 8760 - 1848)) {
            FinalFile << "1,0,1" << std::endl;
        } else {
            FinalFile << "0,1,1" << std::endl;
        }
    }
} else {
    if ((nHourInYear % 24 < 8) || (nHourInYear % 24 > 19)) {
        FinalFile << "0,0,1" << std::endl;
    } else {
        if ((nHourInYear <= 2520) || (nHourInYear >= 8760 - 1848)) {
            FinalFile << "0,0,1" << std::endl;
        } else {
            FinalFile << "0,0,1" << std::endl;
        }
    }
}
}
BaseFile.close();
FinalFile.close();
BaseFile.clear();
FinalFile.clear();
String_Supp = EPLUSFolder_Name + "bin/runenergyplus" + " " + EPLUSRunFolder_Name +
"input.idf input.epw";
system(String_Supp.c_str());

String_Supp = EPLUSRunFolder_Name + "Output/input.csv";
OldName = String_Supp;

String_Supp = "/home/michele_pasqualetto/Scrivania/SCHEDULIZER/hours/heat.csv";
NewName = String_Supp;

Result = remove(NewName.c_str());
Result = rename(OldName.c_str(), NewName.c_str());
return 0;
}
```