



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Statistical investigations and data-driven prediction methods to  
assess total energy use in buildings

(IEA – ECBCS Annex 53)

*M. Filippi, S.P. Corgnati, V. Fabi, N. Talà*



STATISTICAL INVESTIGATIONS AND DATA-DRIVEN PREDICTION METHODS TO ASSESS TOTAL ENERGY USE IN BUILDINGS (IEA – ECBCS ANNEX 53)

M. Filippi, S. P. Corgnati, V. Fabi, N. Talà (Politecnico di Torino)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Studi e Valutazioni sull'Uso Razionale dell'Energia: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Responsabile Progetto arch. Gaetano Fasano, ENEA

## Obiettivi

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE ([www.polito.it/tebe](http://www.polito.it/tebe)) del dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno del più ampio progetto della IEA-ECBCS Annex 53 "Total Energy Use in Buildings".

Il progetto, iniziato con le riunioni preliminari nel 2009, avrà termine nel 2012.

In generale, lo scopo del progetto Annex 53 è l'approfondimento dei metodi di previsione dei consumi totali di energia negli edifici, sia con modelli predittivi diretti che indiretti (*data-driven*), al fine di identificare e valutare l'efficacia di misure, tecniche e politiche di risparmio energetico applicate alla scala sia di singolo edificio che di grande campione edilizio. A questo si affianca la raccolta e l'analisi critica di esperienze considerate significative per una migliore comprensione del comportamento energetico reale degli edifici.

Inoltre, uno specifico approfondimento è dedicato allo studio del comportamento dell'utente e dei fattori influenzanti il consumo energetico ad esso connessi.

## Descrizione del progetto

I principali obiettivi del progetto sono:

- sviluppare nuove metodologie di analisi dei consumi totali di energia degli edifici, studiando i fattori che li influenzano, con una particolare focalizzazione sul ruolo e sul comportamento dell'occupante.
- sviluppare metodologie e tecniche per il monitoraggio dei consumi totali di energia negli edifici, compresi i sistemi hardware e software.
- dimostrare come i dati monitorati possano essere utilizzati per fornire degli indicatori significativi delle prestazioni energetiche degli edifici.
- sviluppare metodi di previsione dei consumi totali di energia negli edifici, per valutare l'impatto di tecniche e di politiche di risparmio energetico.

Si intende inoltre perseguire un miglioramento degli strumenti utilizzati per il *ranking* ed il *labeling* energetico degli edifici, al fine di renderli più comprensibili da parte degli utenti finali.

L'Annex 53 si propone quindi di raggiungere:

- una migliore comprensione dei dati di consumo energetico reale dei sistemi "edificio-impianti", per la valutazione e lo sviluppo di nuove tecnologie e misure di risparmio energetico.
- la conoscenza dei principali fattori che influenzano il consumo totale di energia negli edifici e le loro specifiche/reciproche interazioni, al fine di individuare nuove strategie di risparmio energetico, tecnologie, metodi, etc.
- lo sviluppo di tecnologie di risparmio energetico che tengano conto del consumo energetico attribuibile sia alle prestazioni dell'edificio sia al comportamento dell'utente, al fine di prevedere entrambi gli effetti in edifici nuovi e ristrutturati, nonché il rapporto costi-benefici delle relative misure di risparmio.
- la standardizzazione e il benchmarking del consumo totale di energia nell'edificio con la creazione di indici che considerino anche i fattori legati all'utente, affinché i sistemi di energy labeling siano più comprensibili per l'utente stesso, favorendone l'informazione sui comportamenti scorretti.

La ricerca sarà condotta su uffici ed edifici residenziali, sia singoli che appartenenti a grandi patrimoni edilizi.

Per raggiungere gli obiettivi sopra illustrati, il progetto Annex 53 si divide nei seguenti Subtask:

- Subtask A: Definition and Reporting
- Subtask B: Case Studies and Data Collection
- Subtask C: Statistical Analysis
- Subtask D: Energy Performance Evaluation.

## **Attività del Gruppo Tebe del Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino**

Il Gruppo di Ricerca Tebe del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino partecipa all'Annex 53 con particolare riferimento alle attività dei Subtask A (Definition and Reporting), Subtask B (Case Studies and Data Collection) e Subtask C - Statistical Analysis.

In particolare, al Gruppo di Ricerca TEBE è stato affidato il coordinamento del Subtask C, nel quale quindi opera sia in termini di Subtask Leader che di contributo operativo.

L'apporto nel Subtask A ha riguardato nell'anno 2010 principalmente la definizione degli indici per la caratterizzazione delle prestazioni energetiche dell'edificio; inoltre il Gruppo di Ricerca ha contribuito alla definizione delle caratteristiche del Database di riferimento (il cosiddetto *3 Levels Database*) rispetto a cui i differenti database impiegati nel progetto dovranno confrontarsi.

L'apporto nel Subtask B riguarda la presentazione e l'analisi di casi di studio, ora focalizzati nell'investigazione di un edificio a destinazione uffici di piccole dimensioni nel quale è condotto un monitoraggio continuo di tipo energetico-climatico indoor. Particolari approfondimenti sono indirizzati alla sperimentazione di tecniche statistico-regressive per lo studio dei consumi energetici, nonché di modelli inversi per la previsione dei consumi stessi. Specificamente è stata proposta come caso di studio un edificio per uffici di piccole dimensioni.

L'attività nel Subtask C, che viene anche coordinato, è più dettagliatamente descritta nel testo che segue (tratto da *Newsletter No.1 December 2010* <http://www.ecbcsa53.org>), redatto dal gruppo di ricerca TEBE:

### ***ST-C "Statistical analysis methods to investigate energy use in buildings" – Ongoing activities***

#### *1. Goal*

The aim of ST-C is to investigate and highlight potentialities, possibilities and limitations of statistical tools for a better realistic description of building energy end uses and for a robust prediction of future energy consumptions through data-driven calculation methods. Moreover, a key goal of ST-C is to show up which are the most relevant factors influencing the building final energy end uses: among these factors, a specific focus is dedicated to occupant behavior. Both residential and office buildings are examined.

#### *2. Structure*

The structure of ST-C is shown in the following figure 1C.

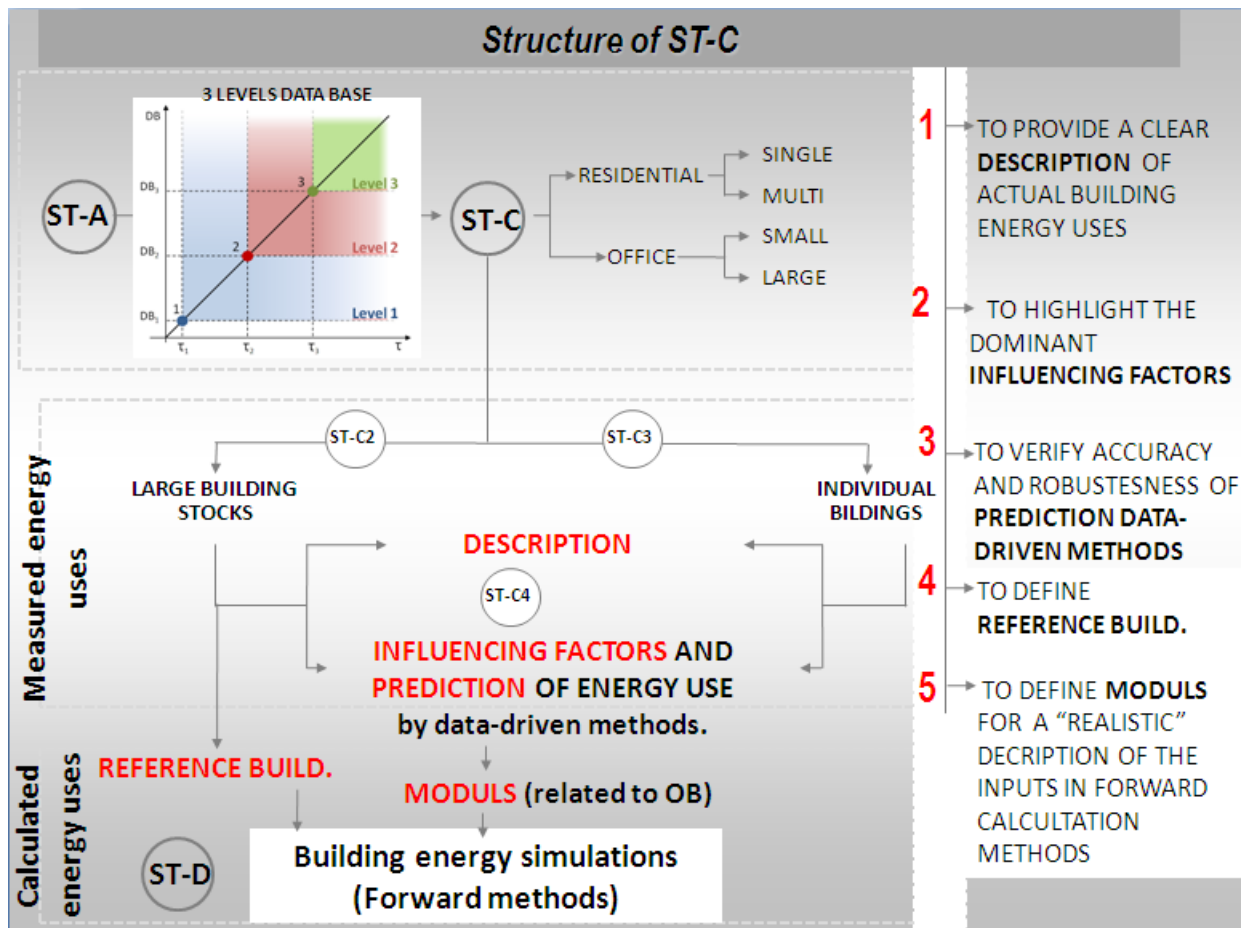


Figure 1C - Research structure of ST-C

Looking at the upper left of the figure, the deep connection between ST-A and ST-C is evident: in order to develop statistical analyses a structured database has to be available. The proposal of a 3 level database has been shared with ST-A, after the discussion on the results of a dedicated carried out literature reviewing activity (this topic is one of the key issues of Work Item 1 of ST-C). The 3 level database structure refers both to the frequency of energy consumption (annual, monthly, daily/hourly) and to the categories of influencing factors. To apply statistical tools and data-driven methods, the availability of a clearly structured database, with a well defined format and item definition, is fundamental: unfortunately, the importance of this matter is too often underestimated. Both for large building stocks and for individual buildings, statistical tools can be mainly used: to statistically describe the characteristics of object of the study (Figure 2C), to point out the dominant factors influencing energy consumptions (Figure 3C) and to predict future total energy uses.

When statistical analyses are used to predict, the performed literature review showed that large building stocks are the main subject of the investigation and the studies are mainly performed applying regression methods or neural network methods.

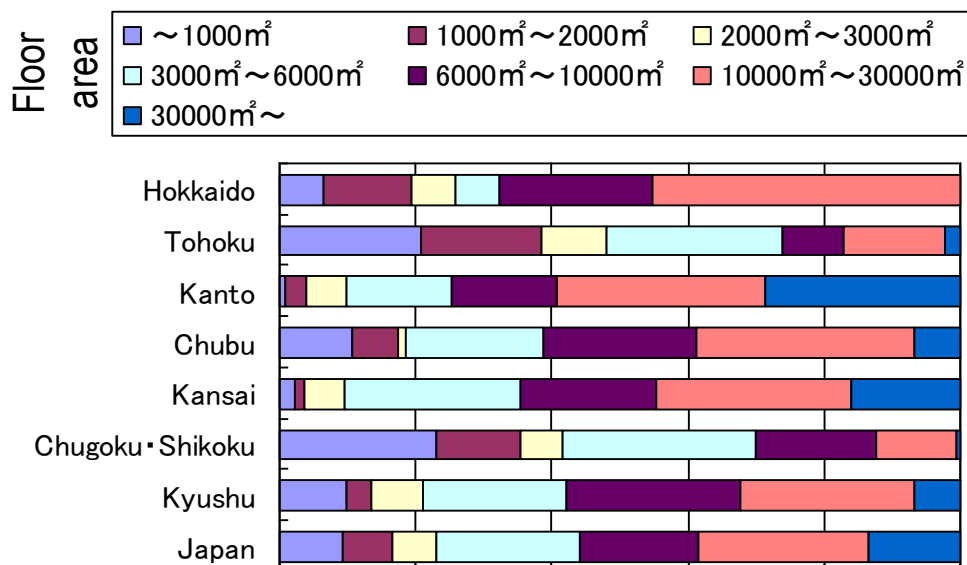


Figure 2C – Statistical analysis to describe: example related to % distribution of office building floor area in the different Japanese regions (building sample of 1099 blds) [by H. Yoshino et al.]

Dependent variable: Total annual energy cons. per floor area [MJ/m<sup>2</sup>]

IF (independent var.)	Unit	Partical Regression Coefficient	Standardized Partical Regression Coefficient
Floor area	m <sup>2</sup>	0.008	0.195
Completed years	Year		
Storeys	F		
Annual business hours	Hours	0.046	0.090
Cooling period	Days	2.084	0.142
Heating period	Days		
Cooling setting temperature	°C		
Heating setting temperature	°C		
Number of regular users	Person/m <sup>2</sup>	8347.339	0.241
Number of temporary users	Person/m <sup>2</sup>		
Cooling degree day	°C·day		
Heatng degree day	°C·day	-0.151	-0.094
Constant	—	982.434	
Coefficient of determination	—	0.211	

Figure 3C – Statistical analysis to highlight dominant influencing factors: example of multiple regression analysis [by H. Yoshino et al.]

Moreover, statistical tools can be applied to define specific “moduls” for a better description of input parameters in forward methods. Therefore, a “modul” is a statistically based input applied to a direct (forward) calculation method, determined in order to provide a more “realistic” description of the phenomenon. In Annex 53, a special emphasis will be given to moduls describing influencing factors related to occupant behavior.

### 3. *Activities*

The ongoing activities can be divided, according to ST-C structure, with reference to the subject of the analysis:

- Large Building Stocks
- Individual Buildings.

Common questions has to be faced: Fixed the goal of the analysis, what are the more appropriate inverse methods according to the Database Level ? What are the dominant influencing factors?

In order to deal with these questions for large building stock, selected benchmark databases will be shared among the partners. First the structures of these databases will be analyzed and the quality of the data will be checked. Then, they will be used and investigated by the different countries, applying different data-driven methods: hypothesis and results, potentialities and limitations will compared.

With reference to the study of data-driven methods applied to individual buildings, the first action will be to check what are the databases available for individual building investigations. At the same time, the possible relationship with ST-B/Case Study will be verified. When the reference databases will be selected, the analysis of the potentialities of the different inverse methods will be examined.

### **Risultati attesi e conseguiti delle attività del Gruppo TEBE per l'anno 2011 nell'ambito del progetto di ricerca**

Si elencano di seguito le attività previste e condotte dal gruppo di ricerca:

#### *Attività 1*

Raccolta e analisi delle esperienze internazionali riguardanti l'uso di metodi statistici e di modelli inversi per la stima dei consumi energetici degli edifici.

*Consegna:* Aprile 2011 (3rd Expert Meeting, Copenhagen-DK)

#### *Attività 2*

Applicazione e test di modelli statistici per la caratterizzazione degli edifici di riferimento (archetipi) in grandi patrimoni edilizi.

*Consegna:* Settembre 2011 (4rd Expert Meeting, Berkley-USA)

#### *Attività 3*

Sperimentazione di modelli inversi sul database di riferimento per l'individuazione dei principali fattori influenzanti il consumo energetico.

*Consegna:* presentazione primi risultati a Settembre 2011 (4rd Expert Meeting, Berkley-USA)

#### *Attività 4*

Studio e individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente, altri fattori influenzanti e consumi energetici degli edifici.

*Consegna:* presentazione primi risultati a Settembre 2011 (4rd Expert Meeting, Berkley-USA)

Si descrivono di seguito gli esiti delle attività condotte.

## Attività 1

### **Raccolta e analisi delle esperienze internazionali riguardanti l'uso di metodi statistici e di modelli inversi per la stima dei consumi energetici degli edifici**

Sono stati raccolti attraverso la collaborazione con i partner del progetto numero 53 pubblicazioni scientifiche sul tema oggetto di della Attività 1 di cui sopra, principalmente indirizzate all'esame di edifici residenziali e a destinazione ufficio. Vista la molteplicità e l'interesse dei contributi raccolti, si sta studiando una modalità per rendere fruibile attraverso un accesso web la consultazione delle pubblicazioni.

Inoltre, le risultanze di questo studio saranno elaborate e costituiranno la base per lo sviluppo del paragrafo 1 del capitolo relativo al SubTask C nel Report finale del progetto.

Lo studio condotto si è focalizzato in questa fase di approfondimento su una definizione chiara della struttura del database di raccolta dei dati di monitoraggio energetico e ambientale degli edifici.

In particolare, il database ha la necessità di essere articolato su più livelli in vista delle diverse possibilità di elaborazioni dei dati successive. L'esperienza in corso di sviluppo da parte del progetto IEA-ECBCS Annex 53 ha portato alla proposta di classificazione del database attraverso più livelli, ciascuno caratterizzato da un maggior dettaglio di informazioni acquisite e frequenza dei dati raccolti.

In generale, ogni database è popolato mediante 2 tipologie di dati:

- dati/informazioni “stazionarie” o “quasi stazionarie” (volumi, superfici, caratteristiche dell'involucro edilizio, caratteristiche degli impianti, etc.), cioè quelle grandezze che presentano una variazione nel tempo saltuaria e/o ben cadenzata su tempi lunghi (per effetto di manutenzioni e riqualificazioni, ma non per effetto delle dinamiche termiche quotidiane dell'edificio)
- dati/informazioni “dinamiche” (consumi, temperature, profili reali di occupazione, etc.), cioè quelle grandezze che presentano una continua variazione nel tempo e che sono oggetto del monitoraggio energetico- ambientale continuo.

I dati raccolti possono poi essere ricondotti ad una famiglia di fattori influenzati il consumo energetico. Il progetto IEA-ECBCS Annex 53 ha introdotto una utile suddivisione dei fattori influenzati in sei famiglie, come mostrato nella seguente figura.

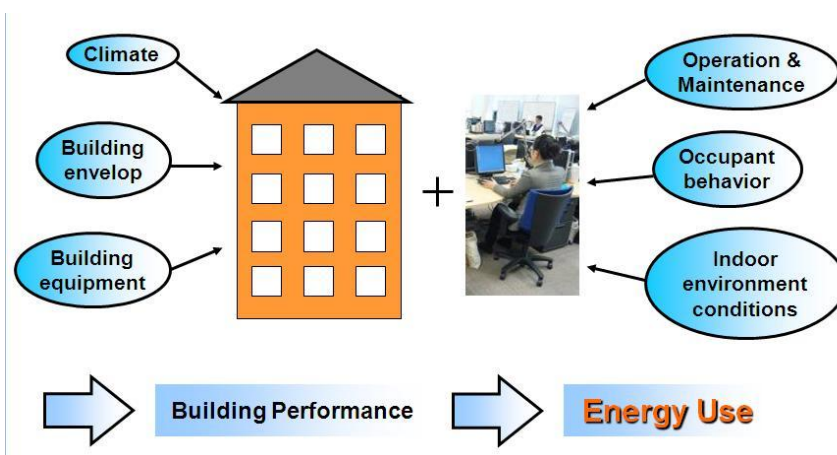


Figura 4 – Fattori influenzanti i consumi di un edificio



Ai sei fattori sopra presentati, se ne aggiunge poi un settimo: il fattore socio-economico.

Sempre secondo la proposta di IEA-ECBCS Annex 53, i database vengono suddivisi in base a tre criteri:

- categorie di fattori influenzanti rappresentate nel database (si noti infatti che sono pochi i database che raccolgono informazioni relative a tutte e 6 le categorie di fattori influenzanti)
- scansione temporale di acquisizione delle grandezze “dinamiche”
- numero di informazioni/dati relative a ciascuna categoria di fattori influenzati

E' evidente che prima di tutto occorre definire con precisione il soggetto sul quale l'analisi intende focalizzarsi. Cercando forzatamente di creare delle famiglie di riferimento, possiamo dividere il soggetto delle analisi in 3 grandi famiglie:

- edificio singolo, quando l'analisi è indirizzata allo studio di uno specifico e singolo edificio (o, al più, ad un gruppo di edifici singoli)
- ampi patrimoni edilizi, quando l'analisi è indirizzata ad un gruppo statisticamente rappresentativo di edifici, che tipicamente presentano identica destinazione d'uso (residenziale, uffici, scuole, etc.) ed, eventualmente, ulteriori similarità
- database estesi a livello nazionale o regionale, usati tipicamente per analisi di tipo statistico sviluppati su un numero estremamente elevato di edificio di cui si conoscono alcune caratteristiche rappresentative.

Quando l'oggetto di studio è il singolo edificio, è necessario raccogliere un numero elevato di parametri per descrivere in modo sufficientemente esaustivo il comportamento energetico dell'edificio e l'analisi si può spingere fino alla disaggregazione dei consumi in ciascuno degli usi energetici finali (consumi per il riscaldamento, per il raffrescamento, per la ventilazione, per l'illuminazione, etc.). In sintesi, tanti dati per un solo edificio.

Al contrario, quando l'analisi è sviluppata su campioni edilizi estesi, fino ad arrivare al livello nazionale, possono essere sufficienti un numero relativamente contenuto di parametri descrittivi del comportamento energetico del campione oggetto di studio. In sintesi, pochi dati per tanti edifici.

Dopo avere identificato chiaramente il soggetto dello studio, il database può essere strutturato con riferimento alle categorie di fattori influenzanti che vengono raccolte; si sono in particolare individuati 3 livelli:

- Livello 1 – categorie di fattore influenzanti: clima, involucro edilizio, impianti
- Livello 2 – categorie di fattore influenzanti: Livello 1 + controllo&manunenzione, condizioni ambientali indoor
- Livello 3 - categorie di fattore influenzanti: Livello 2 + comportamento degli occupanti

I tre livelli possono inoltre contenere informazioni relative al settimo fattore influenzante (aspetti sociali ed economici).

Infine, il database può essere strutturato in relazione alla frequenza raccolta dei parametri dipendenti dal tempo come segue:

Livello 1\* – frequenza: annuale

Livello 2\* – frequenza: mensile

Livello 3\* - frequenza: orario ( o sub-oraria)

E' importante sottolineare che la struttura del database, ed in particolare la frequenza di campionamento dei dati, è fortemente correlata ai metodi di elaborazione e analisi dei dati che vogliono essere adottati, che rappresenterà la successiva fase di approfondimento nell'ambito dei lavori svolti dal gruppo di ricerca nel progetto Annex 53.

#### Pubblcazioni redatte relative al tema:

- *“il monitoraggio energetico e ambientale del patrimonio edilizio esistente”*  
Cognati S.P., ATTI ciclo incontri “Innovazione tecnologica sostenibile in edilizia”, in corso di pubblicazione, Torino 2011.

#### **ABSTRACT**

L'interesse rivolto al monitoraggio dei consumi energetici reali degli edifici si è molto amplificato durante gli ultimi anni poiché, nella pratica quotidiana, la conoscenza dell'effettivo comportamento energetico degli edifici risulta essere più importante della valutazione della loro prestazione energetica attraverso un calcolo teorico come quello ottenuto dalla certificazione energetica adottata in Italia.

Inoltre, è molto difficile effettuare una previsione realistica del consumo energetico degli edifici quando non è noto il consumo reale e non sono stati chiaramente identificati i fattori maggiormente influenzanti il consumo stesso.

Inoltre, attraverso la raccolta di dati mediante un sistema di monitoraggio, possono essere evidenziate tendenze e statistiche che aiutano alla comprensione delle dinamiche energetiche e dei consumi degli edifici.

In questo articolo, viene affrontato il tema del monitoraggio energetico e ambientale indoor negli edifici e vengono discusse le questioni relative alla raccolta e alla elaborazione dei dati.

#### **Attività 2**

##### ***Applicazione e test di modelli statistici per la caratterizzazione degli edifici di riferimento (archetipi) in grandi patrimoni edilizi.***

L'attività di ricerca ha affrontato lo studio di una metodologia utile alla definizione di modelli di edifici per il benchmarking. In particolare sono state proposte diverse procedure fondate su basi statistiche.

La rappresentazione di un patrimonio edilizio attraverso un insieme ridotto di edifici di riferimento è un'operazione alquanto complessa a causa dell'ampio spettro di caratteristiche che contraddistinguono un edificio.

Allo scopo di definire un edificio di riferimento descrivente le caratteristiche termiche e geometriche di un gruppo, è fondamentale identificare le variabili indipendenti che influenzano la moltitudine di parametri specifici all'edificio.

L'identificazione di un numero limitato di variabili indipendenti (superficie utile, anno di costruzione, zona climatica, fonte principale per il riscaldamento,...) da correlare ai parametri relativi alle prestazioni energetiche degli edifici (forma esterna dell'edificio, layout esterno, layout interno, rapporto tra la superficie vetrata e quella opaca, isolamento termico,..) rappresenta un passaggio preliminare alla definizione delle procedure proposte. Il passaggio successivo consiste nella

individuazione della variabile indipendente più significativa per la descrizione dell'andamento dei parametri prestazionali al fine di ricercare la relazione analitica intercorrente tra di essi attraverso analisi statistiche.

Le caratteristiche dei modelli di edificio sono dedotte sulla base delle informazioni estrapolate dal Database dei Certificati di Prestazione Energetica della Regione Piemonte.

L'analisi estensiva dei dati contenuti nel database ha suggerito l'eliminazione delle informazioni ritenute non affidabili, il numero di certificati è stato così ridotto da 66023 a 7104 suddivisi in base a 4 tipologie edilizie. La fonte dei dati ha imposto di fissare la prima variabile indipendente nella zona climatica, mentre la scelta della seconda variabile indipendente è stata la tipologia edilizia delle case a schiera.

Tale processo di scelta ha condotto alla selezione di un campione composto da 339 abitazioni sul quale si sono concentrate le analisi.

La trasmittanza termica media delle superfici trasparenti dell'edificio di riferimento del campione selezionato è stata dedotta statisticamente correlando il parametro  $U_w$  alla superficie utile  $A_u$ . Sono stati quindi valutati i valori di trasmittanza termica associati alle funzioni statistiche 1° quartile, mediana e 3° quartile per ciascuno dei 10 gruppi definiti dai decili della popolazione in termini di superficie utile. I tre valori di dispersione sono stati riportati in corrispondenza del valore centrale di ciascuno dei 10 gruppi. Infine si sono ricercate le funzioni approssimanti rappresentate dalle curve di regressione mediante la tecnica dei minimi quadrati.

Il risultato è un intervallo di variazione del parametro  $U_w$  al variare della superficie utile.

La metodologia esposta per il parametro trasmittanza termica è ripetibile, *mutatis mutandis*, per altri parametri prestazionali.

L'attività di ricerca in corso mira a creare banche dati per generare valori di default da utilizzare per simulazioni energetiche dettagliate usando il Database dei Certificati di Prestazione Energetica della Regione Piemonte e di definire statisticamente i principali parametri influenzanti la certificazione energetica dell'edificio.

In questo filone di ricerca sono state condotte "analisi cluster" sul campione selezionato ed oggetto delle analisi statistiche precedentemente esposte. La procedura ha permesso di identificare il gruppo contenente l'edificio di riferimento (archetipo).

#### Pubblicazioni redatte relative al tema:

- *Statistical analysis methods to investigate Energy use in buildings*  
Corgnati S. P., Fabi V., Talà N., Filippi M., Proceedings of 3rd International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the built Environment (PALENC 2010), Rhodes Island, Greece, 29 Sett-01 Oct 2010

#### **ABSTRACT**

If, in one hand, the recent energy regulations addressed to the new and retrofitted building try to improve the energy performance of buildings, in the other hand, the large part of the national buildings stocks all over the world is old and with very poor energy saving qualities.

The forecast of actual energy consumption in existing buildings is one of the major topics faced by the research in the last year: the energy demand of the building sector is continuously increasing especially due to a significant rise of the electrical energy requirements.

The poor information about the thermo-physical characteristics of the existing buildings and the difficulties to develop reliable "direct methods", is pushing the research to deepen the potentialities of "inverse methods" application for the energy consumption prediction.

When inverse methods are applied, the first step of the study is dedicated to statistical analyses aimed at showing the key factors related to and influencing the building energy consumption. Then, according to the quality and typology of the collected data, suitable inverse methods can be investigated and applied.

Looking at the extreme situations, the study can be finalized to different goals. One is the analysis and forecast of energy consumption of large building stocks: in this case, typically, a wide number of buildings, each of them characterized by a few number of building parameters, is known. On the other extreme, the object of the analysis is one single buildings, being known very detailed information about its parameters.

Anyway, the ultimate goal is the same: the prediction of future consumption by mean of dedicated inverse methods and this is the challenge of Sub-Task C of IEA-ECBCS Annex 53. To score this goal, a large literature review is firstly developed, focused on both large stocks and single buildings.

This paper introduces some basic aspects of statistical analysis and prediction method suitable for energy consumption investigations. Moreover, from the devoted literature review developed in Annex 53, some significant experiences about the application of “inverse methods” are presented and critically discussed.

- *Definition of building typologies for energy investigations on residential sector by tabula iee-project: application to Italian case studies*  
Ballarini I., Corgnati S. P., Corrado V., Talà N., Proceedings of 12<sup>th</sup> International Conference on Air distribution in rooms-ROOMVENT 2011. Trondheim, Norway, 19-22 June 2011

## ABSTRACT

The Building Typologies are a set of model buildings with their own age of construction, geometrical, thermo-physical, equipment and energy performance properties. Their definition is a fundamental step addressed to different goals:

- identify the building types with the poorest energy performance;
- estimate the energy saving potentials of different refurbishment strategies;
- simulate and monitor the effect of specific policies and measures;
- develop analyses for energy advice, portfolio assessment or energy saving potential (at local, national or European level).

Within this scenario, the IEE-Project TABULA is aimed to create a harmonized structure for European Building Typologies, focusing on residential buildings: the topic of the research is how to collect, elaborate and analyze data characterizing national building stock in order to define “typical” buildings able to express a Building Typology.

In fact, different strategies with different level of information details can be adopted for “typical” building definition.

In this paper, the different approaches for defining the “building typologies” are presented and tested in TABULA project are firstly introduced. In particular, three methods are explained to show the developed benchmark models: the first method identifies building types based on several assumptions deduced by an expert without statistical data; the second method processes empirical data to pick out real buildings that are representative of the stock; finally, the third method provides a building that is the most probable of a group of buildings.

Then, these approaches are applied to some Italian case studies: example building characteristics, statistical analysis on residential building database, Italian building typologies structures are shown.

Moreover, critical aspects faced in the project and potentialities/limitations of the performed analyses are critically discussed.

- *Improving energy modeling of large building stock through the development of archetype buildings*  
Ballarini I., Corgnati S. P., Corrado V., Talà N., accepted at 12th International Conference of the International Building Performance Simulation Association. Sydney, Australia, 14-16 November 2011

## ABSTRACT

In this paper a selection process, based on statistical techniques, of representative buildings is presented. Starting from a real estate stock it is possible to draw a sample and calculate the relevant sample statistics. As second step, their elaboration permits to pick out real buildings with geometrical and thermo-physical characteristics similar to the average of the building sample. In addition, the results of this method are compared to those obtained by segmentation (or cluster) analysis, that is a method to partition a set of houses into groups having similar profiles.

Finally, using the Piedmont Regional Database of Energy Performance Certificates these approaches are applied in order to verify the reliability of the analyses proposed. Potentialities and limitations of the performed analyses are critically discussed, as well.

## Attività 3

### **Sperimentazione di modelli inversi sul database di riferimento per l'individuazione dei principali fattori influenzanti il consumo energetico.**

Rispetto a quanto previsto, questa attività di ricerca è stata ricalibrata a valle di un confronto tra i partner di progetto avvenuto durante il 3° Expert Meeting di Copenhagen. Infatti, il database messo a disposizione (Japanese database) come riferimento è risultato di assai difficile utilizzo, sia per la struttura del database stesso che per la interpretazione di alcune delle grandezze presenti nel database.

I partner partecipanti al ST-C hanno quindi convenuto di operare un esame comparato di diversi modelli inversi attraverso l'esame delle diverse esperienze condotte dai partner stessi presentate secondo un format comune, proposto dal gruppo di ricerca TEBE.

Le esperienze sono state classificate e collocate nella matrice sotto presentata.

	Number of Buildings		
	Individual	Large Building Stock	National/Regional Level
Single-Family Houses			
Multi-Family Houses			
Office Buildings			

Come risulta evidente dalla matrice l'oggetto di studio è suddiviso tra:

- edifici residenziali mono-famigliari

- edifici residenziali multi-famigliari
- edifici per uffici

Rispetto invece alla dimensione del campione esaminato, come già illustrato nella presentazione di “Attività 1”, l’investigazione è suddivisa tra:

- edifici singoli (individual building)
- ampi patrimoni edilizi (large building stock)
- analisi a livello nazionale/regionale (national/regional level)

Individuata la collocazione di ciascuna esperienza nella matrice, ogni esperienza dovrà essere presentata secondo il seguente schema:

1. *Name of the authors and affiliation*
2. *Field of investigation (individual building, large building stock, national/regional analysis)*
3. *Subject of the work (which kind of building, dimension, location, ...)*
4. *Aim of the work*
5. *Database characteristics (number of buildings, items collected in the database, referring to the 3 levels database and definitions of ST-A)*
6. *Method/Methods applied for the data analysis*
7. *Main results*

Le esperienze saranno presentate durante il prossimo 4° Expert Meeting presso LBL a Berkley (California, USA).

Si riporta di seguito, a titolo di esempio, una delle schede del gruppo di ricerca TEBE per la presentazione di una delle attività di ricerca condotte.

**Name of the authors:** Federica Ariaudo, Stefano P. Corgnati, Marco Filippi (Politecnico di Torino, Italy)

**Field of investigation:** large building stock, Office building

### 1. Subject of the work

About 4000 bank branches evenly distributed on Italian territory. The bank branches dimension varies, in terms of floor area, between 100 m<sup>2</sup> and 45.000 m<sup>2</sup> and its average is 900 m<sup>2</sup>

### 2. Aim of the work

1. to identify the main factors influencing energy consumptions
2. to verify if it is possible to identify a reliable predictive model using widely available influencing factors, which are the only collectable in case of energy characterization of large building stock
3. to analyse electrical consumptions and electrical energy uses (lighting and equipments, cooling consumption and also heating consumptions for those buildings equipped by heat pumps)
4. to identify benchmarks for electrical energy uses and for total primary energy consumption
5. to verify the climate influence on consumptions for cooling and heating
6. to verify if it is possible to identify an overall benchmark for the whole building stock or if it is necessary to divide the building stock into subcategories

### 3. Database characteristics

Data about 3396 bank branches are collected in the database.

In some cases bank branches hold a whole building, in other cases bank branches hold a single or multiple units in a building.

Collected data for each analysed bank branch are:

- conventional Degree Days (according to the Italian code)
- climatic zone (according to the Italian code)
- actual Degree Days where they were known (evaluated according to the Italian code)
- net building floor area
- HVAC plant type (heat pump or boiler + chiller)
- average number of occupants in the bank branch
- annual and monthly electrical consumptions (related to three consecutive years).

These data are easily and quickly collectable also in case of large building stock as in this case.

### 4. Method/Methods applied for the data analysis

*Step 1: energy uses*

The aim of this step is to highlight and analyse typical energy uses of this building type

*Step 2: possible influencing factors on energy consumption*

The aim of this step is to identify possible factors highly influencing Energy consumption. This step provides the list of data to be specifically collected so this step is preparatory to data collection.

*Step 3: sample characterization*

In this step, the investigated sample is characterised by representing its frequency distributions related to known parameters.

*Step 4: data consistency characterization*

The aim of this step is to analyse collected data consistency in order to identify a draft of possible deliverables.

*Step 5: data quality characterization*

Data quality characterization is useful to identify reliability and usability data in future analysis. Moreover this characterization is fundamental to inform future users of the same database about data quality and usability.

*Step 6: correlation analysis*

This step focus on investigation of existing correlation between electrical consumption and net building area, occupant number, HVAC plant type, conventional Degree Days.

*Step 7: analysis of factor influence on electrical consumption*

In this step the influence level of factors on annual electrical consumption was investigated for the entire sample and, separately, for the sample of heat pump bank branches and for the sample of non-heat pump bank branches. The influence level of factors was identified by entering each variable in an hypothetical predictive model of **multiple linear regression** using **stepwise technique**. For each variable entered the result of **F-test** was verified.

*Step 8: actual energy performance indices selection*

Actual energy performance indices were selected according to results of step 7 analysis.

*Step 9: predictive models identification and goodness of fit to reality assessment*

The first part of this step focus on the identification of a mathematical model able to forecast energy consumption of each bank branch. In this case identification of black-box inverse model was chosen, with particular reference to multiple linear regressive models. Least-square method was used to identify model parameters.

The second part of this step focus on goodness of fit to reality assessment by using:

- **coefficient of multiple determination** assessment, with 0,75 as minimum value for the acceptability of the model;
- **ANOVA** (ANalysis Of VAriance);
- **standard error** assessment;
- **t-test** value assessment for each model parameter;
- **F-test** value assessment for the whole model;
- **residuals and standardized residuals analysis**;
- **Durbin-Watson statistic**;
- **Chi-square test**;
- **VIF** (Variation Inflation Factors) assessment.

*Step 10:* assessment of the predictive models goodness of fit on different data set

This step focus on the assessment of the goodness of fit of a model in forecasting energy consumption of a different year related to the identification data set year. This assessment was performed replacing each parameter of the model and testing the resulting model (**t-test** and/or **F-test**).

*Step 11:* energy benchmarking

Benchmarks were identified according to step 8 output. Actual energy performance index was called "benchmark" when it was verified to be constant.

*Step 12:* Results explanation

This step focus on analysis and explanation of previous steps results

## 5. Main results

Net building area and occupant number were found to be statistically significant in influencing energy consumption. Degree Days, especially conventional Degree Days, were found able to have less impact on energy consumption, while HVAC plant type data were found essential to make the distinction among energy uses included in electrical consumption data. Data collected were found useful to identify mathematical models able to forecast with good reliability all-electric bank branches annual energy consumption, but not sufficient to electrical consumption forecasting in bank branches with non-electric heating plant. In the case of all-electric bank branches, a mathematical model was found reliable in forecasting energy consumption based on a data set different from primary data set. A minimum variation between average performance index values was noticed: therefore these values can be called benchmark. After all these values were compared with benchmark found in literature: the deviation was found negligible.

### **Attività 4**

#### ***Studio e individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente, altri fattori influenzanti e consumi energetici degli edifici***

L'attività 4 vede impegnato il gruppo TEBE all'interno della Task Force dell'Annex 53, il cui obiettivo è quello di investigare il ruolo dell'occupante nel consumo energetico finale degli edifici. In questo campo di indagine il ruolo del comportamento degli occupanti è di primaria importanza. Molti studi hanno infatti dimostrato come vi sia spesso una notevole discrepanza tra il consumo di



energia previsto e quello reale, dove una serie complessa di fattori assumono un ruolo significativo. Le ragioni di questa discrepanza sono generalmente poco conosciute e spesso hanno più a che fare con il ruolo del comportamento degli utenti che con la progettazione degli edifici.

L'attività svolta dal gruppo TEBE si è sviluppata dapprima con una ricerca bibliografica degli studi presenti riguardanti le interazioni tra l'occupante e i sistemi di controllo degli edifici, al fine di individuare un approccio metodologico di indagine sull'intero processo che porta al consumo energetico e sui meccanismi che influenzano il comportamento degli utenti relativamente al controllo dell'ambiente interno. In particolare, questo processo vede come operatore centrale l'occupante che risponde a degli stimoli ("Forzanti" interne od esterne) tramite delle azioni o, più correttamente, scenari di azioni (azioni operate dall'occupante stesso sui sistemi di controllo dell'ambiente interno, dai dispositivi di controllo ed azione dell'edificio e parzialmente dal comportamento dell'edificio stesso) che hanno degli effetti (variazioni di parametri fisici ambientali) sia sulla qualità dell'ambiente interno sia sui consumi energetici dell'edificio. Le variazioni sul consumo di energia e sull'ambiente interno costituiscono dunque l'elemento finale, il risultato dell'intero processo descritto, la cui importanza può variare in base alle modalità con cui sono intrapresi gli scenari di azione: ovviamente, operazioni effettuate in modo responsabile e cosciente porteranno ad un minor consumo di energia. È significativo osservare come questo intero processo non costituisca un processo chiuso, ovvero le variazioni portate dagli effetti degli scenari d'azione sul consumo energetico e sulla qualità dell'ambiente interno, costituiranno esse stesse un elemento di impatto sulle "Forzanti" che influenzano l'utente. Data questa continuità intrinseca nel processo, diventa forse più corretto parlare di un ciclo di processi che influenza il comportamento degli utenti.

Dal momento in cui questo approccio metodologico ha evidenziato come il comportamento degli utenti sia il risultato della combinazione di diversi fattori, l'attività successiva alla quale il gruppo TEBE si è dedicato è stata l'identificazione delle cause influenzanti il comportamento dell'utente ("Forzanti") con riferimento ai tre temi maggiormente indagati in letteratura: ventilazione naturale, ed in particolare apertura e chiusura delle finestre, riscaldamento e raffrescamento, ed illuminazione con riferimento all'utilizzo delle schermature mobili.

Le forzanti individuate negli studi in letteratura sia per gli edifici residenziali che per uffici sono state suddivise in 5 categorie principali: fisico-ambientale, contestuale, psicologica, fisiologica e sociale.

La fase successiva dell'analisi si è sviluppata attraverso l'identificazione dei principali modelli di comportamento dell'utente presenti in letteratura con riferimento ai tre temi individuati per l'analisi delle forzanti. In particolare si è evidenziata la discrepanza tra i modelli di comportamento umano e i modelli usati negli strumenti di simulazione energetica, che si basano fondamentalmente su due approcci diversi. I modelli di comportamento dell'occupante pubblicati si basano su algoritmi statistici che predicono la probabilità di un'azione o di un evento, mentre i programmi di simulazione energetica degli edifici sono in grado di modellare i comportamenti in modo deterministico (completamente prevedibile e ripetibile), fondandosi su equazioni termodinamiche che definiscono le azioni umane (ad esempio il funzionamento delle luci o l'uso dei sistemi oscuranti o delle finestre) tipicamente in base a orari fissi predefiniti o regole predefinite.

L'ultima fase della ricerca fino ad ora intrapresa si è concentrata in particolare sul tema della ventilazione naturale con riferimento al comportamento rispetto all'uso delle finestre.

I primi studi che si riferiscono al tema si sono sviluppati intorno agli anni '90 del secolo scorso e hanno visto coinvolte le residenze, con una prospettiva legata al comfort e alla salute degli occupanti, ma senza lo sviluppo di modelli di comportamento utili per l'implementazione nei software. L'attenzione nel panorama scientifico internazionale si è spostata poi sugli uffici, con una prospettiva legata maggiormente alle prestazioni energetiche degli edifici, dove una serie di studi ha permesso di sviluppare algoritmi statistici di comportamento dell'utente di cui alcuni già integrati in programmi di simulazione (come ad esempio l'algoritmo proposto da Humphreys nel 2002 o l'algoritmo di Yun entrambi integrati in ESP-r).

L'attività sta proseguendo con l'identificazione di un modello di comportamento con riferimento all'uso delle finestre per le residenze, basato su un'analisi condotta con il programma statistico R su un campione di residenze monitorate nel periodo Gennaio-Agosto 2008 in Danimarca.

Pubblicazioni redatte relative al tema:

- *Effect of occupant behavior related influencing factors on final energy end uses in buildings*  
Fabi V., Corgnati S.P., Andersen R.V., Filippi M., Olesen B.W. , Proceedings of Climamed11, Madrid June 2-3 2011.

**ABSTRACT**

Different aspects are investigated in order to highlight the causes of increased energy consumption in buildings: in particular, the ongoing project IEA ECBCS Annex 53 groups the "influencing factors" into seven major categories empathising the role of occupant behaviour on energy consumptions.

In fact, although building envelope and systems characteristics are known to have a significant effect on energy consumption, their performances can be already assessed in the design phase: and their energy performances have significantly increased in recent years for new and retrofitted buildings thanks to regulations and policies.

At the same time, there has been a shift in the direction of research related to energy and environmental performance of buildings towards a focus on human-centred concerns. One key reason is a greater awareness that these concerns of human well-being are key-parameters in the performance of buildings, as highlighted by the huge gap between real and predicted energy consumptions depending on actual use of the buildings.

Based on a dedicated literature review, the effect of the occupant behaviour on the energy consumptions is here firstly introduced. Then, the influencing parameters affecting final energy end uses (heating, cooling, ventilation, lighting) are presented and critically discussed in order to show the importance of a better description of occupant behaviour in energy prediction tools.

- *"Description of occupant behavior in building energy simulation: state-of-art and concepts for their improvement."*  
Fabi V., Andersen R.V., Corgnati S.P., Filippi M., Olesen B.W. accepted at 12th International Conference of the International Building Performance Simulation Association. Sydney, Australia, 14-16 November 2011

**ABSTRACT**

Energy and indoor environmental performance of buildings are highly influenced by outdoor/indoor climate, by building characteristics, and by occupants' behaviour. Building simulation tools cannot precisely replicate the actual performance of buildings because the simulations are based on a number of basic assumptions that affect the results. Therefore, the calculated energy performance may differ significantly from the real energy consumption. One of the key reasons is the current inability to properly model occupant behaviour and to quantify the associated uncertainties in building performance predictions. By consequence, a better description of parameters related to occupant behaviour is highly required. In this paper, the state of art in occupant behaviour modelling within energy simulation tools is analysed and some concepts related to possible

improvements of simulation tools are proposed towards more accurate energy consumption predictions.

- *Main physical environmental occupant behaviour drivers with regard to natural ventilation*  
Fabi V., Andersen R.V., Corgnati S.P., Filippi M., Olesen B.W. accepted at Building Physics Conference2012 , Kyoto Japan, May 28-31 2012.

## **ABSTRACT**

Energy consumption in buildings is influenced by several factors, mainly regarding the building properties and the building controls, some of them highly related to the behaviour of its occupants. On the basis of several studies presented in literature some items referring to the occupant behaviour related to the building control can be defined and the general process leading to energy consumptions can be identified.

The paper focuses on the particular topics of natural ventilation concerning the occupants habits of opening/closing the windows. The investigations are related to the analysis of both the main factors that influence the occupant to interact with the building control systems, the actions the building user performs to control the indoor environment and the effects related to different occupants behaviours in residential buildings. Preeminent variables influencing the occupant to use windows are investigated and the main results of a literature review are highlighted. Statistical analysis of data coming from measurements of occupants' window opening conducted in 15 dwellings in Denmark are performed to infer probability of opening and closing windows and to determine the relationship between the environmental conditions and the windows behaviour. The main physical environmental variables that have been found to be important drivers in determining the action to open or close windows are defined on the basis of the measurements.

The ultimate goal is to provide information for more accurate description of the input parameters for the design of new/restored buildings to a better prediction of the building energy performance.