



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di una metodologia e strumenti per
la definizione della valutazione sui consumi
energetici dei comportamenti dell'utenza.
(IEA – ECBCS Annex 53)

M. Filippi, S. P. Corgnati, M. Perino, V. Fabi



SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA E STRUMENTI PER LA DEFINIZIONE DELLA VALUTAZIONE SUI CONSUMI ENERGETICI DEI COMPORTAMENTI DELL'UTENZA.

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

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo:

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA



Il presente documento descrive l'attività di ricerca concernente lo "Sviluppo della metodologia comparativa cost-optimal secondo la Direttiva 2010/31/UE" svolta all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Strumenti e metodi per la valutazione dell'efficienza energetica negli edifici*"

Responsabile scientifico ENEA dell'Accordo di collaborazione: Gaetano Fasano

Responsabile scientifico Politecnico di Torino dell'Accordo di collaborazione: Marco Filippi

Responsabile scientifico Politecnico di Torino dell'Attività: Stefano Paolo Corgnati

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
2.1 STUDIO E INDIVIDUAZIONE DELLE RELAZIONI TRA COMPORTAMENTO DELL'UTENTE, ALTRI FATTORI INFLUENZANTI E CONSUMI ENERGETICI DEGLI EDIFICI.....	9
2.2 METODOLOGIA PER LA MODELLAZIONE E LA SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELL'UTENTE.....	11
2.3 VERIFICA DELL'ACCURATEZZA DEI MODELLI DI COMPORTAMENTO.	16
3 CONCLUSIONI.....	18
4 PUBBLICAZIONI REDATTE RELATIVE AL TEMA.	19
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	21

Sommario

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE (www.polito.it/tebe) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno delle linee di approfondimento dettate dal progetto ECBCS-Annex 53 "Total Energy Use in Buildings" della International Energy Agency, iniziato con le riunioni preliminari nel 2009 e termine nel 2012. Il gruppo TEBE ha partecipato in modo propositivo fin da subito allo sviluppo del progetto stesso, facendosi carico del coordinamento di uno dei Sub-Task. Alla luce degli importanti risultati ottenuti nello sviluppo del precedente progetto, il gruppo TEBE ha partecipato in prima linea allo sviluppo della proposta per un nuovo Annex, presentata nell'ExCo meeting di Roma in giugno 2013, dal titolo "Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings", che ha avuto approvazione di prosecuzione.

In generale, lo scopo del progetto IEA-ECBCS Annex 53 è l'approfondimento dei metodi di previsione dei consumi totali e degli usi finali di energia negli edifici, sia con modelli predittivi diretti che indiretti, al fine di identificare e valutare l'efficacia di misure, tecniche e politiche di risparmio energetico applicate a diverse scale di studio, dalla scala del singolo edificio fino a quella grande campione edilizio. A questo si affianca la raccolta e l'analisi critica di esperienze significative per una migliore comprensione del comportamento energetico reale degli edifici. Inoltre, uno specifico approfondimento è dedicato allo studio del comportamento dell'utente e alla determinazione che esso ha sui consumi energetici reali degli edifici. La finalità di questo lavoro è stato dunque lo studio e l'individuazione delle relazioni tra il comportamento dell'utente e i consumi energetici degli edifici con particolare riferimento agli aspetti di apertura e chiusura delle finestre. Lo studio è stato rivolto inoltre anche alla definizione di un modello analitico per la caratterizzazione dell'uso delle finestre e la sua validazione. La ricerca ha preso conseguentemente in considerazione l'individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente, altri fattori influenzanti e consumi energetici degli edifici con particolare riferimento agli aspetti di azioni combinate sul termostato per il controllo della temperatura ambiente e l'uso delle finestre. L'attività si è quindi conclusa con la proposta di un modello analitico descrivente tali interazioni.

Il lavoro è stato strutturato in due fasi, come segue:

A.1. Comportamento utente: definizione e validazione di modelli per apertura/chiusura finestre

L'obiettivo principale di questa fase del lavoro è stata la definizione di modelli stocastici del comportamento dell'utente, sviluppati sulla base di analisi statistiche di data set ottenuti dal monitoraggio della reale interazione uomo-edificio. L'uso reale delle finestre da parte degli utenti (apertura/chiusura) è stato quindi considerato come parametro di input di tipo probabilistico per i programmi di simulazione energetica degli edifici. Per ognuna delle variabili è stata costruita una funzione di regressione logistica, in seguito implementata nel programma di simulazione energetica dinamica dell'edificio IDA Ice. Nello studio sull'uso delle finestre in relazione alla ventilazione naturale, è stata svolta una specifica azione legata alla riproducibilità dei modelli di comportamento, tramite la verifica della loro accuratezza. La procedura seguita si basa sull'assunto che le previsioni, positive o negative (finestra aperta o finestra chiusa) possono essere vere positive o false positive (o vere negative/false negative). A partire dal rapporto tra veri positivi (o falsi positivi) con la totalità delle osservazioni, si determina quindi l'accuratezza della previsione. Questa procedura in particolare è stata applicata per verificare l'accuratezza dei modelli di apertura/chiusura finestra sviluppati.

A.2. Comportamento utente: modello ibrido di controllo del termostato e uso delle finestre

La ricerca svolta in questa azione hanno avuto l'obiettivo di sviluppare un approccio sperimentale in scenari successivi alla modellazione dinamica statistica del comportamento dell'utente all'interno degli edifici. A

ogni modello stocastico è stata aggiunta variabilità probabilistica degli input considerati, secondo un approccio incrementale: partendo da un approccio standardizzato e deterministico alla modellazione dinamica, la ricerca ha di seguito definito dei modelli cosiddetti “ibridi”. Tali modelli considerano in maniera probabilistica tutte le variabili correlate al comportamento dell’utente nell’ambito dell’apertura/chiusura finestre e la selezione della temperatura di set-point per il riscaldamento. Poiché il livello d’interazione degli utenti nei confronti dell’apertura e chiusura delle finestre potrebbe essere differente dalla regolazione della temperatura interna, diversi modelli sono stati in seguito implementati. Tali modelli nascono dalla combinazione di ciascuno dei profili di utente per l’apertura/chiusura delle finestre con i profili d’interazione per la regolazione del termostato.

1 Introduzione

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE (www.polito.it/tebe) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno delle linee di approfondimento dettate dal progetto ECBCS-Annex 53 "Total Energy Use in Buildings" [1] della International Energy Agency, iniziato con le riunioni preliminari nel 2009 e termine nel 2012. Il gruppo TEBE ha partecipato in modo propositivo fin da subito allo sviluppo del progetto stesso, facendosi carico del coordinamento di uno dei Sub-Task. In particolare, l'attività 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. Alla luce degli importanti risultati ottenuti nello sviluppo del precedente progetto, il gruppo TEBE ha partecipato in prima linea allo sviluppo della proposta per un nuovo Annex, presentata nell'ExCo meeting di Roma in giugno 2013, dal titolo "Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings", che ha avuto approvazione di prosecuzione.

In questo campo di indagine il ruolo del comportamento degli occupanti è di primaria importanza. Gli edifici hanno un comportamento dinamico, e le interazioni degli operatori, occupanti, e designer influenzano la prestazione energetica degli edifici. Al centro di questa attività risiede la convinzione che le soluzioni tecniche da sole non sono sufficienti per far fronte alle grandi sfide del risparmio energetico mantenendo o addirittura migliorando i livelli di comfort attuali. Gli edifici sono progettati con componenti collaudati e sistemi in genere affidabili, ma le persone che li vivranno possono essere imprevedibili e irrazionali. Gli studi in letteratura rivelano inoltre che esiste un notevole divario tra il modo con cui i progettisti si aspettano che gli occupanti utilizzino un edificio, e il modo in cui effettivamente lo faranno funzionare. Effettivamente, vi è spesso una discrepanza significativa tra l'uso di energia degli edifici previsto e quello reale. Le ragioni di questo divario sono in genere poco conosciute e in gran parte hanno più a che fare con il comportamento umano piuttosto che con la progettazione degli edifici. La conoscenza delle interazioni dell'utente all'interno dell'edificio è dunque un aspetto fondamentale per una migliore comprensione e di conseguenza una previsione più valida delle prestazioni dell'edificio (in termini di consumo di energia e di qualità climatica dell'ambiente interno) e il funzionamento efficace dei sistemi. È stato dimostrato che edifici situati nello stesso luogo (stesso clima), con le medesime caratteristiche di involucro e sistemi installati, e di conseguenza con lo stesso valore di prestazione energetica dell'edificio, possono mostrare grandi differenze nei consumi energetici reali (Figura 1) dovuti a:

- Diversa gestione e manutenzione effettiva,
- Diverso livello di qualità climatica ambientale interna effettiva,
- Diverso comportamento degli occupanti (variabile tra un'utenza attenta e consapevole all'utenza superficiale e disattenta)

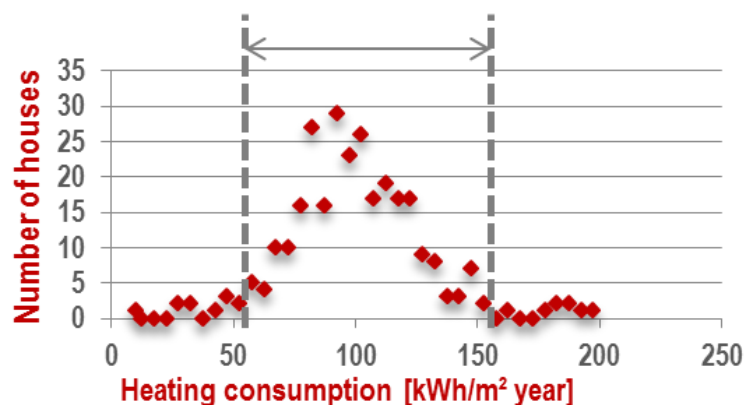


Figura 1. Frequency distribution of heat consumption in 290 investigated "identical" houses in Denmark, [2]

Lo studio condotto con la seguente attività rappresenta uno studio teorico ed empirico sull'incertezza della valutazione del consumo energetico considerando il comportamento degli occupanti in edifici residenziali. Lo scopo principale di questa ricerca è quello di proporre una metodologia per modellare il comportamento dell'utente con riferimento ai consumi energetici reali e applicata ad un caso di studio. La metodologia si delinea con uno spostamento verso una modellazione probabilistica del comportamento degli occupanti relativo al controllo dell'ambiente interno: l'obiettivo è quello di determinare modelli di comportamento degli utenti capaci di descrivere l'interazione con l'edificio e i sistemi. La procedura proposta viene quindi applicata a dei casi di studio: in particolare vengono definiti sia dei modelli di uso delle finestre ("window opening behaviour") sia modelli di preferenze di set-point di riscaldamento in ambito residenziale.

Questa attività, dunque, si basa sul presupposto che attraverso solo il passaggio della simulazione energetica dinamica da un approccio deterministico ad una probabilistico sarà possibile ottenere una previsione dei consumi energetici più vicina alla realtà. Questo approccio probabilistico è legato alla variabilità e alla imprevedibilità del comportamento dell'occupante durante l'intero ciclo di vita dell'edificio: cruciale diviene quindi tenere conto della presenza degli occupanti e delle loro interazioni con l'edificio e sistemi. In realtà, allo stato attuale, gli strumenti di simulazione energetica degli edifici riproducono spesso le dinamiche degli edifici usando equazioni numeriche che modellano comportamenti solo deterministici (completamente prevedibili e ripetibili). In tal modo, con il termine "simulazione del comportamento degli occupanti" si fa riferimento a una simulazione numerica che prevede la generazione di "schedules" fisse relative sia all'occupazione che al comportamento degli utenti. Queste schedules dunque rappresentano un comportamento immaginario di un occupante dell'edificio nel corso di una giornata tipica. Effettivamente, questa è una limitazione importante degli strumenti di simulazione energetica delle prestazioni energetiche degli edifici, mettendo in evidenza che i risultati ottenuti sono essenzialmente non realistici.

Nella prima parte dell'attività svolta è descritto lo sviluppo teorico della modellazione del comportamento degli occupanti degli edifici sulla base di una indagine bibliografica. Vista la complessità del tema, è stata effettuata una revisione specifica degli studi presenti al fine di definire le variabili dominanti ("drivers") che spingono l'utente ad interagire con l'edificio e i sistemi. In particolare, sono stati investigati con uno sguardo critico gli studi legati alle abitudini di apertura e chiusura delle finestre. A partire da questa visione generale del tema viene dunque elaborato il quadro teorico entro cui risiede la logica delle interazioni occupanti-edificio-sistemi volte a migliorare o mantenere le desiderate condizioni ambientali interne. L'analisi degli studi di letteratura evidenzia come un approccio comune sull'identificazione dei parametri guida, i "drivers", non è stato ancora raggiunto.

Successivamente, è stato proposto un metodo per la modellazione del comportamento degli occupanti di tipo probabilistico. L'approccio si definisce a partire da un monitoraggio a medio/lungo termine di parametri ambientali interni ed esterni e delle azioni comportamentali degli utenti (apertura della finestra, regolazione del set point di riscaldamento, ecc.). In questo approccio di modellazione di tipo probabilistico, a partire dai dati raccolti, è possibile definire diversi modelli di comportamento degli utenti mediante analisi statistiche (regressione logistica, catene di Markov, etc..). Questi modelli statistici di comportamento quindi vengono implementati negli strumenti di simulazione energetica degli edifici. Inoltre, una distribuzione probabilistica dei consumi al posto di un singolo valore è da preferirsi come una più realistica rappresentazione delle prestazioni energetiche degli edifici. La procedura proposta è stata applicata ad un caso studio sull'uso delle finestre e sulle preferenze del set-point di temperatura in ambito residenziale, tramite la definizione di modelli stocastici di comportamento dell'utente implementati e poi simulati nello strumento di simulazione energetica degli edifici IDA Ice.

L'ultima attività della ricerca è legata alla validazione dei modelli statistici definiti per garantire la loro efficacia. In questa parte della ricerca, i dati di un campione analogo di abitazioni dove gli stessi parametri interni ed esterni sono stati raccolti, vengono utilizzati per validare i modelli di comportamento. La validazione viene eseguita confrontando le previsioni di apertura e chiusura delle finestre con lo stato

attuale delle finestre registrato nelle abitazioni. Dal momento in cui in letteratura sono presenti alcuni modelli logistici legati all'uso delle finestre, in funzione della temperatura interna, temperatura esterna o entrambe, anche questi modelli vengono verificati con questa procedura di validazione.

Nel complesso, l'attività condotta dal gruppo TEBE nell'ambito della Task Force dell'Annex 53 sottolinea l'importanza di descrivere il comportamento dell'individuo legato all'interazione con edifici e sistemi in modo più accurato e realistico, al fine di comprendere le differenze nei consumi di energia reali degli edifici. Inoltre, nonostante l'applicazione descritta in questa tesi sia limitata per la maggior parte delle analisi all'uso delle finestre, il metodo presentato può essere applicato anche ad altri tipi di azioni comportamentali.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Studio e individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente, altri fattori influenzanti e consumi energetici 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 raffigurato in **figura 2** 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.

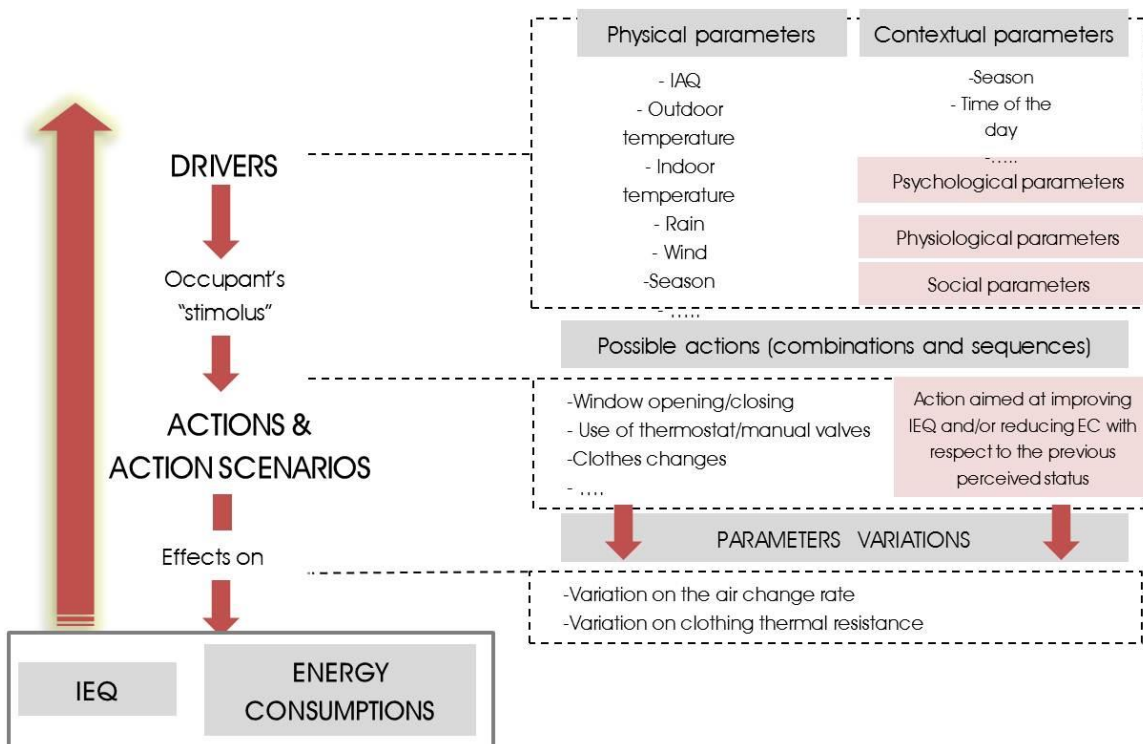


Figura 2. Diagramma di flusso dai drivers ai consumi energetici

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.

Categoria Fisico - ambientale:

Esempi di aspetti dell'ambiente fisico che guidano il comportamento dell'utente relative all'uso dell'energia negli edifici sono la temperatura, l'umidità relativa, la velocità dell'aria, il rumore, l'illuminazione e l'odore.

Categoria Contestuale:

Esempi di fattori contestuali sono l'isolamento degli edifici, l'orientamento delle facciate, il tipo di impianto di riscaldamento, il tipo di termostato (manuale o programmabile per esempio), ecc.

Categoria Psicologica:

Gli occupanti tendono a soddisfare le loro esigenze relative al comfort termico, al comfort visivo, al comfort acustico, alla salute, alla sicurezza, ecc. Inoltre, gli occupanti hanno determinate aspettative riguardanti per esempio la qualità dell'ambiente interno (temperatura, ecc.) Altri esempi di forzanti psicologiche sono la consapevolezza (ad esempio preoccupazione finanziaria, la preoccupazione ambientale), le risorse cognitive (conoscenze ad esempio), abitudini, stile di vita, la percezione.

Categoria Fisiologica:

Esempi di forzanti fisiologiche sono l'età, il sesso, la situazione sanitaria, l'abbigliamento, il livello di attività, cibi e bevande. Questi fattori insieme determinano la condizione fisiologica dell'occupante.

Categoria Sociale:

Le forzanti sociali si riferiscono all'interazione tra occupanti. Per gli edifici residenziali questo dipende dalla composizione del nucleo familiare (ad esempio quale membro della famiglia determina il set-point del termostato o l'apertura / chiusura delle finestre).

Nella **figura 3** le forzanti per l'apertura/chiusura della finestra, regolazione del set-point di temperature e regolazione delle schermature solari sono evidenziati. L'intersezione fra i tre ambiti definisce quei drivers comuni per le tre azioni, evidenziando la stretta relazione esistente tra il comportamento dell'utente legato alla ventilazione naturale, riscaldamento e illuminazione.

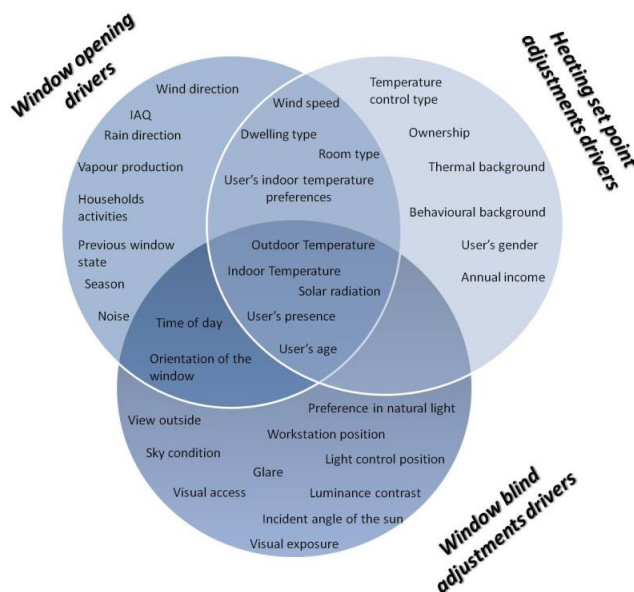


Figura 3. Drivers preminenti per uso delle finestre, termostato e schermature solari

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.

2.2 Metodologia per la modellazione e la simulazione del comportamento dell'utente.

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 [3, 4, 5, 6], 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 inseriti in programmi di simulazione (come ad esempio l'algoritmo proposto da Nicol e Humphreys nel 2004 [7] o l'algoritmo di Yun [8] entrambi integrati in ESP-r).

Così come descritta nella letteratura, la filosofia su cui si fonda l'approccio metodologico di tipo probabilistico è basata sulla modellazione statistica del comportamento dell'utente. Gli eventi in natura non si ripetono mai uguali nel tempo, al contrario si distinguono per intrinseche fluttuazioni di prestazione e intensità. Per questo motivo, il nuovo approccio metodologico prende in considerazione la distribuzione probabilistica di input e output legati al comportamento dell'utente, cercando di superare il divario presente tra i consumi energetici previsti in fase di progetto e quelli reali, creato dalle precedenti applicazioni deterministiche alla modellazione dinamica dell'edificio. L'approccio pratico alla modellazione statistica si basa su quattro passaggi operazionali, rappresentati in [figura 4](#):

1. Raccolta dati (oggettivi e soggettivi) provenienti da misurazioni in campo (monitoraggi, questionari);
2. Analisi statistica dei dati raccolti e comprensione dei principali parametri influenzanti il comportamento dell'utente (coefficienti e variabili), attraverso la definizione di una curva di regressione logistica;
3. Implementazione della regressione logistica in programmi di simulazione energetica dinamica;
4. Considerazione di una distribuzione probabilistica degli output.

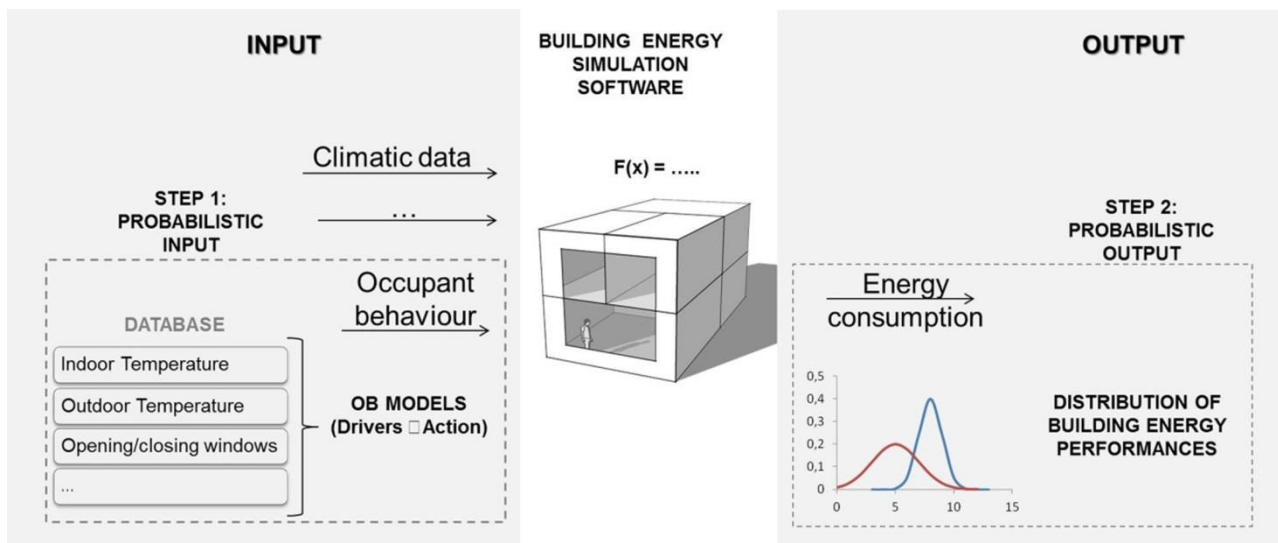


Figure 4. I due step dell'approccio probabilistico

L'apertura e la chiusura delle finestre e la selezione della temperatura di set-point sono stati considerati input di tipo probabilistico. Per ognuna delle due variabili è stata costruita una funzione di regressione logistica, in seguito implementata nel programma di simulazione energetica dinamica dell'edificio IDA Ice (Figura 5).

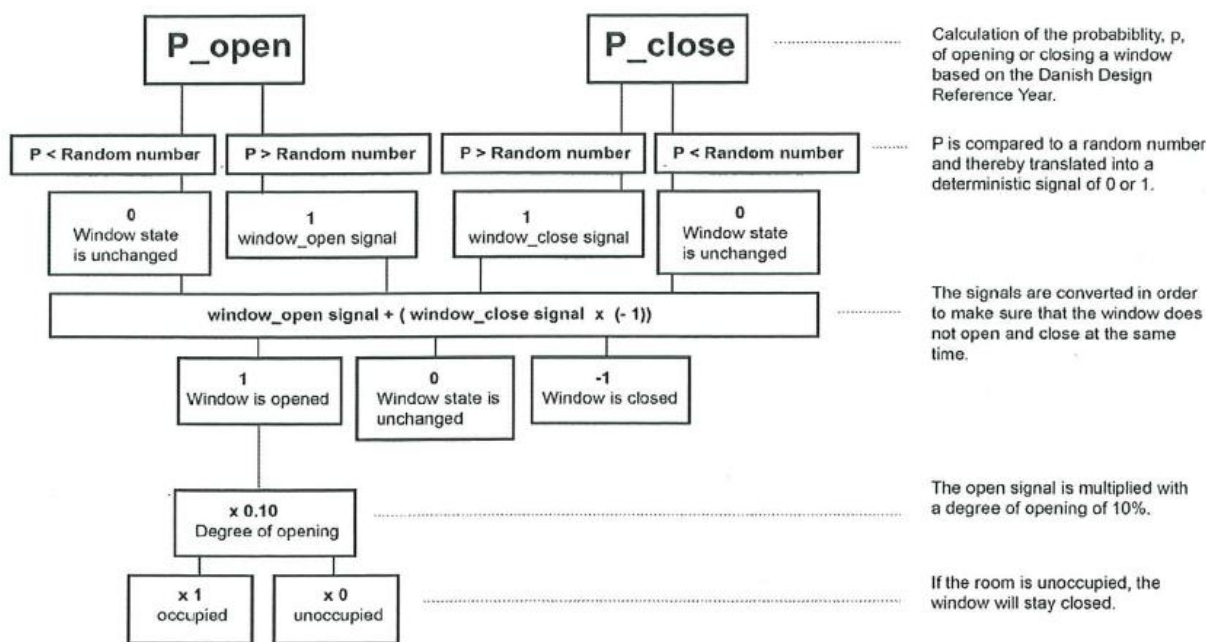


Figure 5. Algoritmo statistico implementato nel software di simulazione

Nell'ambito di questa attività sono stati sviluppati quattro modelli statistici predittivi del comportamento dell'utente all'interno degli edifici residenziali. A titolo di esempio delle analisi statistiche di probabilità effettuate per l'uso delle finestre e l'uso del termostato, in figura 6, viene raffigurato l'andamento della probabilità di apertura della finestra in funzione del momento della giornata e della concentrazione di CO₂.

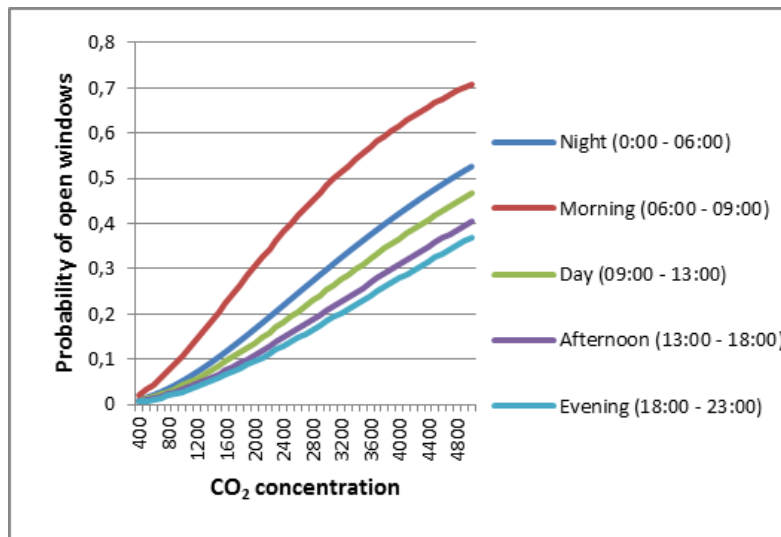


Figure 5. Raffigurazione della probabilità di aperture della finestra per diversi momenti della giornata e concentrazione del livello di CO₂

A ogni modello statistico è stata aggiunta, secondo un approccio incrementale, una variabilità probabilistica degli input considerati: partendo da un approccio standardizzato e deterministico alla modellazione dinamica, la ricerca ha di seguito definito modelli cosiddetti “ibridi”. Tali modelli considerano in maniera probabilistica tutte le variabili correlate al comportamento dell’utente nell’ambito dell’apertura/chiusura finestre e la selezione della temperatura di set-point per il riscaldamento.

Scenario zero

Lo studio condotto ha previsto la performance energetica di una residenza secondo il criterio comunemente utilizzato nei programmi di simulazione energetica dinamica. Il modello costruito seguendo tale metodologia deterministica verrà da seguito utilizzato come riferimento dei consumi energetici (reference model), e paragonato ai risultati ottenuti nelle fasi successive della ricerca.

Scenario I

Nella seconda fase è stato sviluppato un modello comportamentale predittivo in grado di considerare in maniera probabilistica l’apertura e la chiusura delle finestre, mentre la selezione della temperatura di set-point è ancora considerata in qualità di variabile deterministica, sulla base delle categorie di comfort così come descritte dalla norma europea Standard EN 15251:2006 [9].

Scenario II

Entrambe le interazioni dell’utente con il sistema edificio impianto (apertura e chiusura finestre e regolazione del termostato) sono implementate come input statistici nel programma di simulazione dinamica IDA Ice, sviluppando “modelli ibridi”. Nello specifico, la regolazione del termostato è descritta da tre differenti funzioni logaritmiche in grado di riprodurre diversi gradi d’interazione dell’utente (attivo, medio, passivo) con il sistema di controllo della temperatura interna.

Scenario III

In questo scenario, anche l’apertura e la chiusura delle finestre è stata simulata in relazione a profili di interazione dell’utente con il sistema di controllo. Sono stati sviluppati tre modelli statistici in grado di riprodurre il comportamento di utenti Attivi, Medi e Passivi negli edifici residenziali.

Scenario IV

Poiché il grado d’interazione degli utenti nei confronti dell’apertura e chiusura delle finestre potrebbe essere differente dalla frequenza di regolazione della temperatura interna, il modello sviluppato contiene

ancora un grado di approssimazione. Pertanto nove nuovi modelli sono stati in seguito implementati. Tali modelli nascono dalla combinazione di ciascuno dei tre profili di utente per l'apertura/chiusura delle finestre con i tre profili d'interazione per la regolazione del termostato.

Al fine di valutare l'influenza del comportamento dell'occupante sui consumi energetici per il riscaldamento in edifici residenziali, le equazioni di probabilità determinate dagli studi statistici per mezzo del software di analisi statistica R, sono state implementate nel programma di simulazione energetica dinamica degli edifici IDA Ice [Versione 4.1][10].

I modelli comportamentali sviluppati nella ricerca si basano su un modello residenziale composto di due stanze (camera da letto e soggiorno), le cui caratteristiche della cella base sono descritte dalla norma europea Standard 15265:2005 [11]. In **figura 7** è riportata la configurazione geometrica della cella di riferimento.

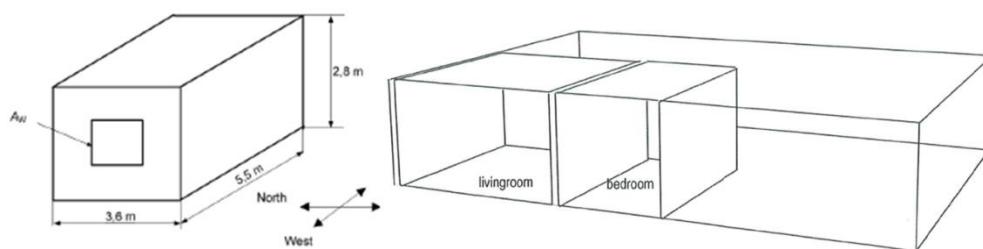


Figure 7. La reference room simulata

Al fine di ottenere un'indicazione dell'abilità dei modelli di replicare l'interazione dell'occupante con i sistemi di controllo e l'involucro edilizio e le eventuali differenze d'influenza di diversi profili di operatività, tutti i modelli sono stati simulati per tre differenti località climatiche: Atene (clima mediterraneo), Francoforte (clima continentale) e Stoccolma (clima nordico) e per le tre categorie di comfort descritte dalla norma europea Standard EN 15251:2006.

I consumi energetici simulati nel modello deterministico di riferimento (singoli valori di output) sono stati comparati con la distribuzione probabilistica dei risultati ottenuti dalla simulazione dei modelli probabilistici. Grazie a tale comparazione la ricerca è in grado di dimostrare che nel caso in cui il ruolo dell'utente nell'interazione con i sistemi di controllo di ventilazione e temperatura (apertura e chiusura finestre e regolazione dei termostati) sia considerato per via probabilistica, i consumi energetici di edifici residenziali aumentano fino al 61% rispetto alle previsioni attuate secondo le procedure standard, facenti utilizzo di input deterministici.

Uno dei principali obiettivi della presente ricerca è quello di confermare che le variazioni nella previsione dei consumi energetici sono principalmente implicabili alle operazioni che gli occupanti attuano sui sistemi di controllo, al fine di ristabilire o ottenere una condizione di comfort termico all'interno delle proprie abitazioni. Lo studio condotto nell'ambito di questa attività ha pertanto focalizzato l'attenzione sulle differenze tra i livelli di qualità dell'ambiente interno, previsti dalla normativa europea Standard EN 15251:2006 e quelli realmente preferiti dagli utenti, e conseguentemente sulla possibile variazione dei consumi energetici dovuta a tale discrepanza.

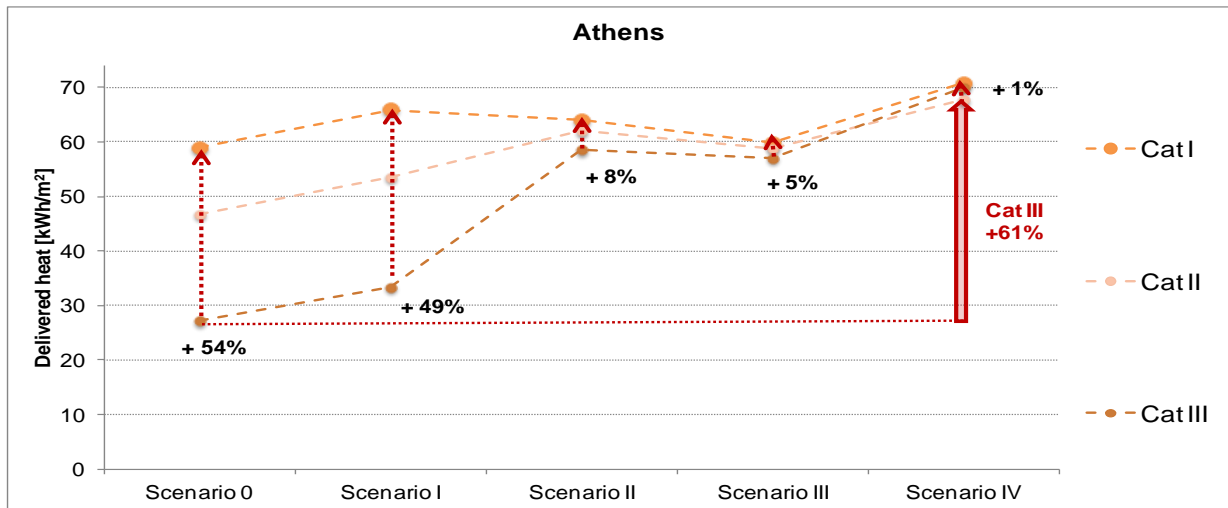


Figure 9. Impatto del comportamento dell'utente sui consumi energetici nei diversi scenari simulati

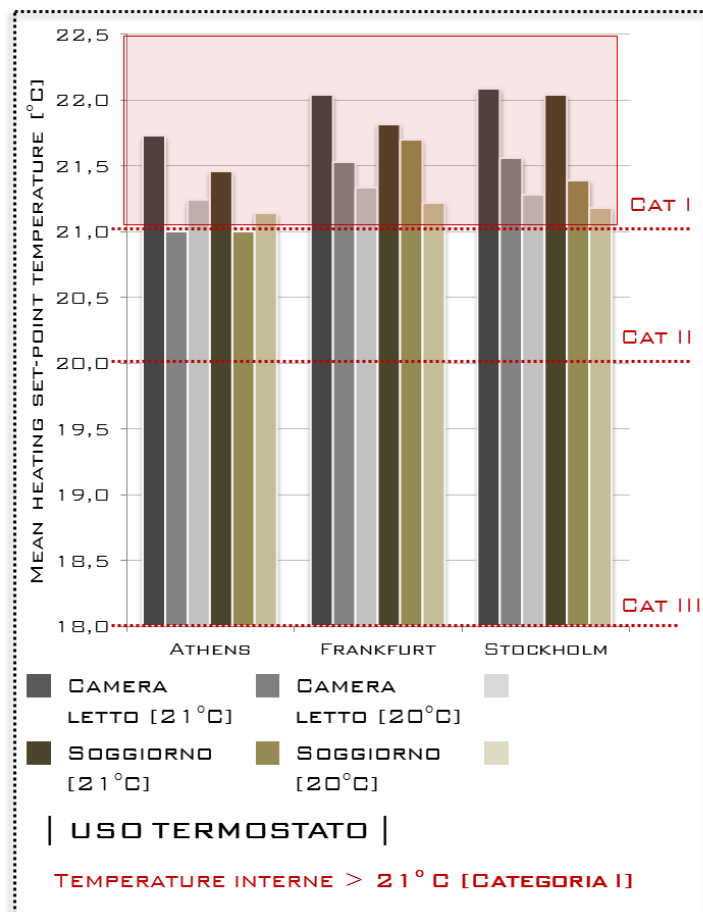


Figure 9. Risultati delle simulazioni per l'uso del termostato

I risultati della ricerca hanno dimostrato che i settaggi di temperatura di set-point durante il periodo di riscaldamento e il numero di ricambi orari, in ambienti residenziali previsti da normativa, sono ben lontani dalle reali preferenze degli utenti negli edifici (figura 8). Per tale ragione, non considerare l'interazione umana con i sistemi di controllo e l'involucro edilizio porterà necessariamente a una sottostima dei

consumi energetici in edifici residenziali. Nello specifico, lo studio ha evidenziato il massimo scostamento nella previsione dei consumi energetici ad Atene, nello specifico per la categoria di comfort III. Tale discrepanza è principalmente attribuibile al fatto che, soprattutto in climi mediterranei, gli edifici non climatizzati tendono a surriscaldarsi durante i mesi più caldi dell'anno e pertanto gli utenti tendono naturalmente ad aumentare le portate di ventilazione (+70% in Luglio, rispetto ai valori standard previsti dalla normativa standard). Inoltre la ricerca ha riscontrato che, qualora gli utenti siano in grado di regolare personalmente il termostato, questi preferiscono temperature interne sempre affini alla categoria di comfort I (temperature interne superiori a 21°C, [Figura 9](#)). Tali risultati confermano che il divario tra i consumi previsti e reali sia parzialmente dovuto al comportamento dell'utente all'interno degli edifici. Per contro, l'importanza del controllo personale delle condizioni ambientali delle abitazioni e dei luoghi di lavoro, è confermata da questo studio come risorsa necessaria al fine di ridurre l'impatto di soluzioni altamente tecnologiche per il condizionamento e il mantenimento della salubrità degli edifici.

2.3 *Verifica dell'accuratezza dei modelli di comportamento.*

L'ultima attività dello studio condotto è legata alla verifica della riproducibilità dei modelli di comportamento, testandone la loro accuratezza. La validazione dei modelli comportamentali degli occupanti, come ad esempio quelli utilizzati per rappresentare l'interazione degli occupanti con l'ambiente costruito, è un tema che sta guadagnando importanza.

L'utilizzo di modelli stocastici per la simulazione delle interazioni degli occupanti con l'ambiente costruito ha notevolmente influenzato l'approccio alla sua modellazione e simulazione nei programmi di simulazione energetica dinamica degli edifici negli ultimi anni [12; 13]. L'aumento della derivazione di modelli stocastici di comportamento degli occupanti porta a riflettere sulla precisione dei modelli ottenuti e la loro riproducibilità su larga scala. Tradizionalmente, quando possibile i modelli statistici vengono verificati e validati con i dati sperimentali, ma generalmente i modelli statistici di comportamento dell'utente pubblicati non vengono testati nella loro accuratezza. In realtà, fino a questo momento, solo due articoli riguardanti la validazione dei modelli comportamentali sono pubblicati in letteratura. Questi modelli riguardano rispettivamente gli edifici per uffici e gli edifici residenziali. Nel 2009, Haldi e Robinson [4] hanno proposto una procedura di validazione incrociata per eseguire la valutazione del potere predittivo dei modelli di comportamento di apertura della finestra sviluppati per edifici per uffici. Applicando i criteri di convalida suggeriti, nel 2011, Schweiker et al. [14] ha testato l'accuratezza dei modelli di comportamento di apertura della finestra utilizzando diversi dataset. Anche se questi due documenti rappresentano un importante milestone sul modo di valutare l'accuratezza predittiva dei modelli stocastici di interazioni degli occupanti con l'ambiente costruito (in particolare con le finestre), rimane ancora uno spazio considerevole per un ulteriore lavoro di ricerca.

Nell'attività condotta ci si è concentrati su un aspetto particolare della validazione del modello - l'effettivo processo di confronto tra le previsioni del modello di osservazioni sperimentali.

Il processo di validazione è soprattutto un modo di misurare le capacità predittive di un modello statistico, testandolo su un insieme di dati non utilizzati nella definizione del modello. L'idea principale dietro la validazione è quindi quella di avere due campioni di dati, uno utilizzato come "campione di addestramento", per generare l'algoritmo, e l'altro campione, il "campione di validazione", che viene utilizzato per stimare la precisione dell'algoritmo.

In questa attività, i modelli per la previsione di azioni occupanti precedentemente sviluppati in relazione all'uso delle finestre, sono stati validati per garantirne la loro efficacia. La procedura utilizzata prevede il confronto tra i dati osservati e simulati di apertura e chiusura delle finestre, permettendo una valutazione imparziale diretta del potere predittivo dei modelli sviluppati: i criteri di validazione proposti ed utilizzati da Haldi e Robison [3] e da Schweiker et al. [14] sono stati applicati per valutare il potere predittivo dei modelli. Il primo aspetto preso in considerazione nei lavori citati [4;14] è il criterio di discriminazione. La procedura seguita si basa quindi sull'assunto che le previsioni, positive o negative (finestra aperta o finestra chiusa) possono essere vere positive o false positive (o vere negative/false negative). A partire dal rapporto tra veri

positivi (o falsi positivi) con la totalità delle osservazioni, si determina quindi l'accuratezza della previsione. Questa procedura in particolare è stata applicata per verificare l'accuratezza dei modelli di apertura/chiusura finestra sviluppati.

I modelli con un forte valore predittivo sono descritti da tassi di veri positivi significativamente più elevati rispetto al tasso di falsi positivi. Infine, l'accuratezza dei modelli restituisce la percentuale di previsioni corrette prendendo in considerazione la proporzione degli esiti "veri" (positivi e negativi) sul totale degli stati misurati della finestra. Dal momento che i modelli sviluppati predicono la probabilità che si verifichi un'azione (di apertura o di chiusura delle finestre), un aspetto importante da prendere in considerazione è il numero di azioni previste sulle finestre. Il confronto tra le azioni osservate di apertura e chiusura delle finestre e quelle previste dai modelli permette una panoramica generale della performance dei modelli.

3 Conclusioni

L'attività condotta dal gruppo di ricerca sul tema definizione della valutazione sui consumi energetici dei comportamenti dell'utenza, si è delineata mediante uno studio teorico ed empirico sull'incertezza della valutazione del consumo energetico dovuta al comportamento degli occupanti in edifici residenziali. Lo scopo principale di questa ricerca è quello di proporre una metodologia per modellare e simulare il comportamento dell'utente nel contesto dei consumi energetici reali, connessa alla sua applicazione dei casi di studio. La metodologia si delinea con uno spostamento verso una modellazione probabilistica del comportamento degli occupanti relativo al controllo dell'ambiente interno: l'obiettivo è quello di determinare modelli di comportamento degli utenti capaci di descrivere l'interazione con l'edificio e i sistemi. La procedura proposta viene quindi applicata a dei casi di studio: vengono definiti dei modelli di comportamento degli occupanti relativi all'uso delle finestre e all'uso del termostato in ambito residenziale. In parallelo si è quindi indagata l'influenza di differenti livelli d'interazione con i principali sistemi di controllo delle condizioni climatiche e ambientali a disposizione degli utenti di edifici residenziali, sul livello di comfort termico e dunque sui consumi energetici per il riscaldamento. Profili comportamentali per utenti Attivi, Medi, Passivi sono stati implementati secondo passaggi logici incrementali al fine di ottenere la più accurata riproduzione possibile dell'interazione dell'utente con i sistemi di controllo e l'involucro edilizio. Seguendo tale approccio, la ricerca qui presentata ha evidenziato quale combinazione di profilo comportamentale di utente sia il più "energy-waster" o "energy-saver" nell'ambito degli edifici residenziali. Nel complesso, lo studio condotto sottolinea l'importanza di indagare e descrivere il comportamento dell'individuo legato all'interazione con edifici e sistemi, al fine di comprendere le differenze nei consumi di energia reali degli edifici. In sintesi, il valore aggiunto dell'attività svolta rispetto allo stato dell'arte, si delinea attraverso l'identificazione della complessità e multidisciplinarietà del tema con una profonda conoscenza della natura, logica, tipologia del comportamento dell'utente legato all'uso di energia negli edifici e la proposta di un inquadramento comune di lavoro tra scienze tecniche e scienze sociali. Inoltre, il vero punto di innovazione della ricerca sul comportamento dell'utente legato all'uso dell'energia, è stato lo sviluppo di una metodologia per modellare e simulare il comportamento "energetico" dell'utente al fine di ottenere una previsione più accurata delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici.

Infine, è da sottolineare come nonostante l'applicazione descritta in questa attività sia limitata per la maggior parte all'analisi delle azioni dell'utente nell'ambito residenziale, il metodo presentato può essere applicato anche ad altri tipi di azioni comportamentali in edifici per uffici.

4 Pubblicazioni redatte relative al tema.

Di seguito si fa un elenco delle principali pubblicazioni prodotte dal gruppo di ricerca su riviste internazionali e conferenze internazionali relative all'analisi dell'influenza del comportamento dell'utente sulla qualità ambientale interna e i consumi energetici.

Peer-reviewed International journals:

- "Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models." *Building and Environment*, Volume 58, December 2012, Pages 188-198. V. Fabi, R.V. Andersen, S.P. Corgnati, B.W. Olesen.
- "A methodology for modelling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings." *Building Simulation Journal*, April 2013, DOI information: 10.1007/s12273-013-0119-6. V. Fabi, R.V. Andersen, S.P. Corgnati, B.W. Olesen
- "Influence of Occupant's Heating set-point preferences on Indoor Environmental Quality and Heating Demand in Residential Buildings." *HVAC&R Research Journal*, April 2013, DOI information: 10.1080/10789669.2013.789372. Fabi, R.V. Andersen, S.P. Corgnati.
- "Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings". Andersen, R., Fabi, V., Corgnati, S.P., Toftum, J., Olesen, B.W. *Building and Environment Journal*, Vol. 69, 2013 pp 101-113.

Peer-reviewed International conference:

- "Effect of occupant behaviour related influencing factors on final energy end uses in buildings". V. Fabi, R.V Andersen, S.P. Corgnati, Filippi M., B.W. Olesen. *Proceedings of Climamed11 Conference*, 2nd – 3rd June 2011. Madrid, Spain.
- "Description of occupant behaviour in building energy simulation: state-of-art and concepts for their improvement". V. Fabi, R.V Andersen, S.P. Corgnati, B.W. Olesen. *Proceedings of Building Simulation Conference 2011*, 14th-16th November 2011, Sydney, Australia.
- "Window opening behaviour:simulations of occupant behaviour in residential buildings using models based on a field study". V. Fabi, R.V Andersen, S.P. Corgnati. *Proceedings of 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world*, 12th-15th April 2012, Windsor, UK
- "Main physical environmental variables driving occupant behaviour with regard to natural ventilation". V. Fabi, R.V Andersen, S.P. Corgnati. *Proceedings of 5th International Building Physics Conference* 28th – 31st May 2012, Kyoto, Japan.
- "Main physical environmental drivers of occupant behaviour with regard to space heating energy demand". V. Fabi, R.V Andersen, S.P. Corgnati, Venezia, F. *Proceedings of 2nd International Conference on Building Energy and Environment*, 1st-4th August 2012, Kyoto, Japan.
- "Influence of window opening/closing behaviour and heating set-point adjustments on heat consumption in dwellings". Fabi V., D'Oca S., Andersen R.V, Corgnati S.P. *Proceedings of Clima 2013 Conference*, 16th – 19th June 2013, Prague, Czech Republic.
- "Validation of models of window opening behaviour in residential buildings". V. Fabi, R.V Andersen, S.P. Corgnati. *Proceedings of Building Simulation Conference 2013*, 25th-28th August, Chambéry, France
- "Robustness of building design with respect to energy related occupant behaviour". V. Fabi, T. Buso, R.V Andersen, S.P. Corgnati. *Proceedings of Building Simulation Conference 2013*, 25th-28th August, Chambéry, France
- "Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models." *Building and Environment*, Volume 58, December 2012, Pages 188-198. V. Fabi, R.V. Andersen, S.P. Corgnati, B.W. Olesen.

- “A methodology for modelling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings.” Building Simulation Journal, April 2013, DOI information: 10.1007/s12273-013-0119-6. V. Fabi, RV. Andersen, SP. Corgnati, BW. Olesen
- “Influence of Occupant’s Heating set-point preferences on Indoor Environmental Quality and Heating Demand in Residential Buildings.”. HVAC&R Research Journal, April 2013, DOI information: 10.1080/10789669.2013.789372. Fabi, RV. Andersen, SP. Corgnati.
- “Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings”. Andersen, R., Fabi, V., Corgnati, S.P., Toftum, J., Olesen, B.W. Building and Environment Journal, Vol. 69, 2013 pp 101-113.

5 Riferimenti bibliografici

1. IEA – EBC Annex 53. “total Energy use in buildings. Analysis and evaluation methods”. 2010-2012.
2. Heenningsen Henningsen O, Energi og vandforbrug i 290 huse (Energy and water consumption in 290 houses), WS Denmark, February,1999, Vol. 35, No. 2 (in Danish,- summary in english)
3. Dubrul C., Technical note AIVC 23, Inhabitant behavior with respect to ventilation - A summary Report of IEA Annex VIII, March 1988.
4. Haldi F., Robinson D., Interactions with window openings by office occupants, Building and Environment 44 (2009) 2378-2395.
5. Rijal H. B., Tuohy P., Humphreys M. A., Nicol J. F., 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) 823-836.
6. Andersen R.V., Olesen B.W., Toftum J. Modelling window opening behaviour in Danish dwellings. Proceedings of Indoor Air 2011: the 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Austin, Texas.
7. Nicol J.F., Humphreys M., A Stochastic Approach to Thermal Comfort-Occupant Behavior and Energy Use in Buildings, ASHRAE Transactions 110(2):554-568 (2004).
8. Yun G.Y., Steemers K, Baker N. Natural ventilation in practice: linking facade design, thermal performance, occupant perception and control. Building Research and Information 2008; 36 (6): 608-624.
9. Standard EN 15251 (2008). Criteria for the Indoor Environmental including thermal, indoor air quality, light and noise. European standard.
10. ICE 4, Manual version: 4.0. EQUA Simulation AB (September 2009).
11. Standard EN 15265 (2005). Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling – General criteria and validation procedures.
12. Herkel S., Knapp U., Pfafferott J., Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings, Building and environment 43 (2008) 588-600
13. Schweiker M., Shukuya M., Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-usage behavior in a residential setting under Japanese climatic conditions, Building and Environment 44 (2009) 2137-2149.
14. Schweiker M., F. Haldi, M. Shukuya, D. Robinson, Verification of stochastic models of window opening behavior for residential buildings. Journal of Building Performance Simulation, First published on: 09 June 2011 (iFirst).

6 Abbreviazioni ed acronimi

IEA - International Energy Agency

EBC – Energy in Buildings and Community Programme

IDA – Indoor Climate and Energy