

Measuring users-windows interactions in buildings: behavioural models for the summer season

Federica Naspi*, Francesca Stazi, Marco Arnesano,
Federico Seri, Lorenzo Zampetti, Gian Marco Revel,
Marco D'Orazio

Highlights

Window opening and closing behaviours in offices have been investigated through a monitoring campaign, acquiring occupancy, environmental parameters and occupants' adaptive actions. Users' behaviours are influenced by both environmental parameters (indoor and outdoor temperature) and daily routine. Stochastic behavioural models to predict windows status have been developed using logistic regression methods.

Abstract

Including the human component in simulation software is of primary importance to enhance the building's design and management. In particular, the user-window interaction impacts significantly energy and comfort profiles. Through an environmental and behavioural monitoring, this research investigated windows' opening and closing actions during the summer season in three offices. The analyses highlighted that the behaviours are influenced by both environmental factors and time-related events. Using logistic regression techniques, stochastic behavioural models have been developed to predict windows status.

Keywords

Behavioural models, Adaptive actions, Windows, Offices

1. INTRODUCTION

Recent studies estimated that buildings are the main responsible for energy demand in Europe, contributing to more than 40% to total energy consumptions and about 36% of greenhouse gas emissions [1]. To mitigate these issues, the European Commission is promoting energy policies aimed at reducing the buildings' energy consumptions, increasing their efficiency [2]. In particular, the European Union plans to reduce the consumptions by 30% and the relative CO₂ emissions by 40% by 2050 [3].

The achievement of the targets set at European level led to the development of net-zero energy (NZEB) or zero energy (ZEB) buildings. In such contexts, the building components, the technical and plant solutions reached very



e-ISSN 2421-4574
Vol. 4, No. 1 (2018)

Federica Naspi

DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche 12, Ancona, 60131, Italia

Francesca Stazi

SIMAU - Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente e Urbanistica, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche, Ancona, 60131, Italia

Marco Arnesano

DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche 12, Ancona, 60131, Italia

Federico Seri

Department of Civil Engineering, National University of Ireland, University road, Galway, Irlanda

Lorenzo Zampetti

DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche 12, Ancona, 60131, Italia

Gian Marco Revel

DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche 12, Ancona, 60131, Italia

Marco D'Orazio

DICEA - Dip. di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche 12, Ancona, 60131, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-0712204508;
Fax: +39-0712204771;
e-mail: f.naspi@staff.univpm.it

high performances; however, the performance levels evaluated in the design phase usually are not maintained during the building operation phase [4]. The average gap between real and expected energy consumptions has been estimated at 30% [5], but it can reach values higher than 300% [6].

Occupants' behaviour has been recognised as one of the key factors influencing the energy use in buildings [7] and the lack in considering the human component during the design phases is one of the main reasons of the energy gap [8].

People living the buildings have the objective to obtain and maintain adequate indoor comfort conditions in terms of thermal, visual and air quality. However, the optimal comfort level is peculiar for each person, since it is a function of both objective and subjective aspects. Despite this variability has been widely recognised, in the energy simulation software, the presence of people and their behaviour inside buildings (e.g. windows opening/closing) are simulated by adopting standard profiles and fixed rules. Such deterministic approach, not representative of the dynamic interaction between the users and the building, often underestimates the impact of the human component [9]. On the other hand, probabilistic approaches should be preferred to realistically represent the stochastic nature of users' actions [10].

In the perspective of understanding and analyzing people's energy behaviour, this study aims at providing preliminary results regarding the interaction between users and windows in offices during the summer season. Furthermore, stochastic behavioural models are proposed to predict these actions. Although many studies investigated this interaction, most of them refer to the continental climate (e.g. Central Europe, UK) [11,12] or the warm-humid climate (e.g. China, Japan) [13], while investigations carried out in the Mediterranean area are still lacking.

The proposed research is part of the EU New TREND project. The goal of the project is the development of a collaborative design platform for energy retrofit that optimises the decision-making process, in particular through the enhancement of software tools. In fact, the integration of behavioural models in the simulation environment allows evaluating users' comfort perceptions and their energy impact already during the early design phases.

2. STATE OF THE ART

Users modify the indoor environment either through their presence (e.g. with breathing) or through the actions they perform (e.g. by switching the lights on and off). Predicting the mutual interactions between people and building elements is very complex but necessary to optimise the design and

1. INTRODUZIONE

Studi recenti hanno stimato che gli edifici sono i maggiori responsabili della richiesta di energia in Europa, contribuendo per più del 40% ai consumi energetici totali e per circa il 36% alle emissioni di gas serra [1]. Per mitigare questi problemi, la Commissione Europea sta promuovendo politiche energetiche atte a ridurre i consumi energetici degli edifici, incrementandone l'efficienza [2]. In particolare, l'Unione Europea si pone l'obiettivo di ridurre i consumi del 30% e le relative emissioni di CO₂ del 40% entro il 2050 [3].

Il raggiungimento dei targets imposti a livello europeo ha portato allo sviluppo di edifici a energia quasi zero (NZEB) o a energia zero (ZEB). In questi contesti, i componenti edili, le soluzioni tecniche e impiantistiche hanno raggiunto prestazioni estremamente elevate; tuttavia, i livelli prestazionali previsti in fase di progetto spesso non vengono mantenuti durante l'esercizio dell'edificio [4]. Il gap medio tra consumi reali e attesi è stato stimato pari al 30% [5], ma può raggiungere valori superiori al 300% [6].

Il comportamento delle persone è stato annoverato come uno dei fattori chiave che influenzano l'uso dell'energia negli edifici [7] e la mancata considerazione della componente umana durante le fasi di progettazione è una delle principali cause del gap energetico [8].

Uno degli obiettivi principali delle persone che fruiscono gli edifici è ottenere e mantenere adeguate condizioni di comfort interno a livello termico, visivo e di qualità dell'aria. Tuttavia, il livello ottimale di comfort è peculiare per ogni individuo, poiché esso è funzione di aspetti oggettivi e soggettivi. Nonostante tale variabilità sia stata ampiamente riconosciuta, nei software di simulazione energetica, la presenza delle persone e i loro comportamenti all'interno dell'edificio (a es. apertura/chiusura finestre) vengono simulate adottando profili standard e regole fisse. Questo approccio deterministico, non cogliendo l'interazione dinamica tra utenti ed edificio, spesso sottostima l'incidenza della componente umana [9]. Approcci di tipo probabilistico, invece, sono preferibili per rappresentare in maniera realistica la natura stocastica delle azioni degli utenti [10].

Nella prospettiva di comprendere e analizzare il comportamento energetico delle persone, questa ricerca si propone di fornire dei risultati preliminari relativi all'interazione tra utenti e finestre negli uffici durante il periodo estivo. Inoltre, vengono proposti modelli comportamentali stocastici per la previsione di tali azioni. Sebbene siano numerosi gli studi che hanno indagato tale interazione, la maggior parte di essi si riferisce al clima continentale (ad es. Europa centrale, UK) [11,12] o a quello caldo-umido (ad es. Cina, Giappone) [13], mentre mancano ricerche svolte nell'area mediterranea.

La presente ricerca si inserisce nell'ambito del progetto EU New TREND. L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di una piattaforma collaborativa di progettazione per

management of the environments.

In particular, the interactions between users and windows interested researchers for over 25 years [14], covering many types of buildings, geographic and climatic areas. Identified as one of the most impactful actions on thermal comfort, air quality (IAQ) and energy consumption, window opening is also extremely frequent in naturally ventilated buildings [15–17].

The studies that investigated the nature of user-window relationships identified numerous triggering factors (drivers). They have been classified into environmental, temporal and contextual factors [14]. Among the former, indoor and outdoor temperatures have been recognized as the main parameters influencing both openings and closings [12,18,19]; while CO₂ concentration stimulates only the opening actions [20]. The indoor and outdoor temperatures have been identified as drivers both in the residential area and in the offices; instead, the CO₂ is linked only to homes. Events linked to a specific time of the day influence the use of windows in offices, residences and school classrooms. In particular, in the offices, most of the openings takes place at the first entrance and after the lunch break [18,21]. On the contrary, during intermediate periods the interactions are limited because users tend to adapt to indoor environmental conditions, in terms of both thermal comfort and IAQ [22,23]. The duration of the absence has a significant impact on closing actions; in fact, the longer the duration increases, the more likely the window is closed [24]. Contextual factors influence the actions of the occupants and their frequency of interaction too [25,26]. These include the type of windows, the internal design, the presence of mechanical and/or electrical systems and the levels of external noise and air pollution.

Extensive data collection campaigns and in-depth analyses have led to the development of numerous behavioural models for predicting the use of windows in offices. Most of the proposed models follow a stochastic approach in order to capture the variability of the behaviour of the occupants. The most widely adopted approaches are Markovian chains and logistic regressions. The former, defined “memory” approaches since the action is influenced (at least) by the previous time-step, provides an accurate representation of subjects’ actions [22,27]. However, the computational cost linearly increases with the number of modelled users [28]. Logistic regressions are counted among the Bernoulli models, which define the state of an element according to one or more predictor parameters [29]. Unlike the previous ones, these approaches are “memoryless” because each state is independent of the previous one. They have been widely used to define stochastic models for window opening and closing [13,23,30,31]. Furthermore, logistic regression models have been

il retrofit energetico che ottimizzi il processo decisionale, in particolare grazie al potenziamento di strumenti software. Infatti, l'integrazione dei modelli comportamentali nell'ambiente di simulazione consente di valutare il comfort degli utenti e il loro impatto energetico già durante le prime fasi di progettazione.

2. STATO DELL'ARTE

Gli utenti modificano l'ambiente che fruiscono sia attraverso la loro presenza (ad es. con la respirazione) sia mediante le azioni che compiono (ad es. accendendo e spegnendo le luci). Prevedere le mutue interazioni tra le persone e gli elementi dell'edificio è molto complesso ma necessario per ottimizzare la progettazione e la gestione degli ambienti.

In particolare, le interazioni tra utenti e finestre hanno interessato i ricercatori da oltre 25 anni [14], coprendo numerose tipologie di edificio, aree geografiche e climatiche. Identificata come una delle azioni a maggior impatto su comfort termico, qualità dell'aria (IAQ) e consumi energetici, l'apertura delle finestre è anche estremamente frequente negli edifici ventilati naturalmente [15–17]. Gli studi che hanno indagato la natura delle relazioni tra utenti e finestre hanno identificato numerosi fattori scatenanti (drivers). Essi sono di tipo ambientale, temporale e contestuale [14]. Tra i primi, la temperatura interna ed esterna sono stati riconosciuti come i parametri principali che influenzano sia le aperture sia le chiusure [12,18,19]; mentre la concentrazione di CO₂ stimola unicamente le azioni di apertura [20]. Le temperature interna ed esterna sono state identificate drivers sia in ambito residenziale sia negli uffici, invece la CO₂ è legata unicamente alle residenze. Gli eventi relativi a uno specifico momento della giornata influenzano l'uso delle finestre negli uffici, nelle residenze e nelle aule scolastiche. Negli uffici, in particolare, la maggior parte delle aperture avviene al primo ingresso e dopo la pausa pranzo [18,21]. Al contrario, durante i periodi intermedi di permanenza le interazioni sono limitate perché gli utenti tendono ad adattarsi alle condizioni ambientali interne, in termini sia di comfort termico sia di qualità dell'aria [22,23]. La durata dell'assenza dalla stanza ha un impatto notevole sulle azioni di chiusura; infatti, più aumenta la durata più aumenta la probabilità che la finestra venga chiusa [24]. Anche fattori di tipo contestuale influenzano le azioni degli occupanti e la loro frequenza di interazione [25,26]. Tra di essi si annoverano la tipologia di finestre, il design interno, la presenza di sistemi meccanici e/o elettrici e i livelli di inquinamento acustico e dell'aria esterni.

Estensive campagne di raccolta dati e analisi approfondite hanno portato allo sviluppo di numerosi modelli comportamentali per la predizione dell'uso delle finestre negli uffici. La maggior parte dei modelli proposti segue un approccio di tipo stocastico al fine di cogliere la variabilità del comportamento degli occupanti. Gli approcci maggiormente adottati sono le catene Markoviane e le

used in the definition of predictive algorithms implemented in dynamic energy simulation software [32].

3. METHODOLOGY

The research has been divided into two main phases. A first experimental phase was devoted to experimental data collection, through environmental and behavioural monitoring. The second (analytical phase) focused on the data analysis in order to identify the drivers for occupants' actions and to develop behavioural models to predict the interactions between users and windows.

In detail, the study was carried out in Ancona, at the Università Politecnica delle Marche (Latitude: 43° 35'12"40 N; longitude: 13° 30'59"74 E; altitude: 150 m). The building dates back to the late seventies and has ribbon windows with aluminum frame and double glazing.

Three offices, located on the same floor and characterized by very similar boundary conditions, have been monitored. Occupancy and the number of people in the offices varied according to the users' commitments but, generally, the rooms were occupied by two or three people, from Monday to Friday and from 9 a.m. to 7 p.m.. Figure 1 summarises the main characteristics of each room.

Room	1	2	3
Indoor surface (m ²)	20	20	15
Internal height (m)	3	3	3
Heated volume (m ³)	60	60	45
Ratio S/V (thermal zone)	0,33	0,33	0,33
Orientation	North	North	East
Number of persons	3	3	2
Glazed surface (m ²)	6	6	6
Opening surface (m ²)	3	3	3

Figure 1. Key characteristics of the investigated rooms.

The experimental phase involved three months during the unheated season and lasted from May 3 to July 29, 2016. The monitoring system allowed simultaneous acquisition, in all the rooms, of occupancy, environmental parameters and actions on windows with a time interval of 10 minutes. Figure 2 shows the main features of the sensors installed in the offices. A climatic station owned by the civil protection of Marche, located about 2 km from the case study, allowed to obtain the outdoor air temperature.

regressioni logistiche. I primi, definiti approcci "con memoria" perché l'azione è influenzata (almeno) dal time-step precedente, forniscono una rappresentazione accurata delle azioni dei singoli individui [22,27]. Tuttavia, il dispendio computazionale aumenta linearmente con il numero di utenti modellati [28]. Le regressioni logistiche sono annoverate tra i modelli di Bernoulli, i quali definiscono lo stato di un elemento in funzione di uno o più parametri predittori [29]. Al contrario dei precedenti, questi approcci sono "senza memoria" perché ogni stato è indipendente dal precedente. Essi sono stati ampiamente utilizzati per definire modelli stocastici di apertura e chiusura delle finestre [13,23,30,31]. Inoltre, modelli in regressione logistica sono stati impiegati nella definizione di algoritmi predittivi implementati in software di simulazione energetica dinamica [32].

3. METODOLOGIA

La ricerca è stata suddivisa in due fasi principali. Una prima fase sperimentale è stata rivolta alla raccolta di dati sperimentali, mediante un monitoraggio ambientale e comportamentale. La seconda fase, di tipo analitico, si è focalizzata sull'analisi dei dati al fine di individuare i drivers per le azioni degli occupanti e di sviluppare modelli comportamentali per prevedere l'interazione tra utenti e finestre. In dettaglio, la ricerca è stata svolta ad Ancona, presso l'Università Politecnica delle Marche (Latitudine: 43°35'12"40 N; longitudine:

13°30'59"74 E; altitudine: 150 m). L'edificio risale alla fine degli anni Settanta e presenta finestre a nastro con telaio in alluminio e doppio vetro. Sono stati monitorati tre uffici, situati sullo stesso piano e caratterizzati da condizioni al contorno molto simili. L'occupazione e il numero di persone negli uffici sono variabili in relazione agli impegni degli utenti ma, generalmente, gli ambienti sono occupati da due o tre persone, dal lunedì al venerdì e dalle 9:00 alle 19:00. La Figura 1 riassume le principali caratteristiche dei singoli ambienti.

Parameter	Sensor	Accuracy	Range	Number
Air temperature (°C)	Thermistor (SH75)	±0.4°C	0÷70°C	3 (1 per room)
Relative humidity (%)	Capacitive (SH75)	±1.8%	0÷100%	3 (1 per room)
CO ₂ (ppm)	NDIR	±50 ppm	0÷2000 ppm	3 (1 per room)
Occupancy (number)	PIR	n/a	12 m	3 (1 per room)
Windows opening	Magnetic	n/a	n/a	12 (4 per room)

Figure 2. Main features of the installed sensors.

A logistic regression analysis has been performed to investigate the existence of correlations between environmental variables and users' behaviour. This approach is typically adopted when the dependent variable is dichotomous (0 = closed window, 1 = open window). Logistic regression provides the opening or closing probability, as the input parameters change. This method ensures that the probability is within the range [0,1] and accurately approximates the lower and upper limits [33]. The probability distribution is shown in Equation 1.

$$p(x_1, \dots, x_n) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)} \quad (1)$$

The vector of the constant coefficients β_0, \dots, β_n includes the estimated values through the maximum likelihood method, while the independent variables x_1, \dots, x_n are the environmental factors that induce the users to take the action. This approach has been adopted by numerous studies [27,32] to estimate the probability of an action occurring as a function of one or more predicting variables.

To verify the strength of the obtained correlations, three goodness-of-fit estimators, commonly evaluated in the case of logistic regression analysis, have been calculated [23,34,35]. In detail, the three estimators are the area under the ROC curve (AUC), the McFadden R² and the Nagelkerke R². These dimensionless indices provide higher values as the statistical validity of the correlations increases.

4. RESULTS

This section proposes a brief analysis of environmental conditions and users behaviours on windows recorded during the monitoring. Furthermore, provisional stochastic opening and closing models obtained through logistic regression analyses are proposed.

Figure 3 analytically shows the distributions of environmental conditions in

La fase sperimentale ha interessato tre mesi durante la stagione non riscaldata e si è protratta dal 3 maggio al 29 luglio 2016. Il sistema di monitoraggio ha permesso l'acquisizione simultanea in tutti gli ambienti di occupazione, parametri ambientali e azioni sulle finestre con un intervallo di acquisizione di 10 minuti. La Figura 2 mostra le principali caratteristiche dei sensori installati negli ambienti. Una stazione climatica di proprietà della protezione civile delle Marche, collocata a circa 2 km dal caso di studio, ha permesso di ottenere la temperatura dell'aria esterna.

Lo studio della presenza di correlazioni tra le variabili ambientali e il comportamento degli utenti è stato eseguito mediante l'analisi in regressione logistica. Questo approccio viene tipicamente adottato quando la variabile dipendente è di tipo dicotomico (0= finestra chiusa, 1= finestra aperta). La regressione logistica fornisce la probabilità che l'evento di apertura o chiusura avvenga, al variare dei parametri di input. Questo metodo assicura che la probabilità sia compresa nell'intervallo [0,1] e approssima accuratamente i limiti inferiore e superiore [33]. La distribuzione di probabilità è riportata nell'Equazione 1.

Il vettore dei coefficienti costanti β_0, \dots, β_n racchiude i valori stimati attraverso il metodo della massima verosimiglianza, mentre le variabili indipendenti x_1, \dots, x_n sono i fattori ambientali che inducono gli utenti a intraprendere l'azione. Tale approccio è stato adottato da numerosi studi [27,32] per stimare la probabilità di accadimento di un'azione in funzione di uno o più variabili aleatorie.

Per verificare la validità statistica delle correlazioni ottenute sono stati calcolati tre estimatori della bontà di adattamento, comunemente valutati in caso di analisi in regressione logistica [23,34,35]. In dettaglio, i tre estimatori sono: l'area sotto la curva ROC (AUC), l'R² di McFadden e l'R² di Nagelkerke. Questi indici adimensionali forniscono valori più elevati all'aumentare della validità statistica delle correlazioni.

4. RISULTATI

Nella presente sezione si propone una breve analisi delle condizioni ambientali e dei comportamenti di interazione tra utenti e finestre registrati durante il monitoraggio. Inoltre, vengono proposti modelli stocastici previsionali di apertura e chiusura, ottenuti mediante l'analisi

the three offices and the external ones. Both the indoor parameters and the outdoor temperature differ between the spaces since the analyses refer only to occupied periods, different for each room. Although the offices orientation is different, the rooms all have rather similar distributions with average values of temperature and relative humidity close to the reference values for the summer period (Temp.: 26 °C, RH: 50%) [36]. The highest values of indoor temperature (34.1 °C) and relative humidity (79%) were recorded in Room 3; they are a consequence of the east exposure, and therefore of direct solar radiation in the early morning hours. The low CO₂ concentrations (500 ppm), recorded in all environments, are a function of the monitoring period. In fact, window openings, very frequent during the summer, help in maintaining adequate IAQ conditions. Despite this, there are numerous events characterized by concentrations greater than 1000 ppm.

in regressione logistica.
La Figura 3 mostra analiticamente le distribuzioni delle condizioni ambientali nei tre uffici e di quelle esterne. Sia i parametri interni sia la temperatura esterna differiscono tra gli ambienti poiché le analisi sono riferite ai soli periodi di occupazione, diversi per ogni stanza. Sebbene l'orientamento degli uffici sia differente, tutti gli ambienti presentano distribuzioni piuttosto simili con valori medi di temperatura e umidità relativa interne prossimi ai valori di riferimento del periodo estivo (Temp.: 26 °C; UR: 50 %) [36]. Nella Stanza 3 sono stati registrati i massimi valori di temperatura interna (34,1 °C) e di umidità relativa (79 %); essi una conseguenza dell'esposizione a est, e quindi della radiazione solare diretta nelle prime ore del mattino. Le basse concentrazioni di CO₂ (500 ppm), registrate in tutti gli ambienti, sono funzione del periodo di monitoraggio. Infatti, le aperture delle finestre, molto frequenti durante il periodo estivo, contribuiscono a mantenere adeguate

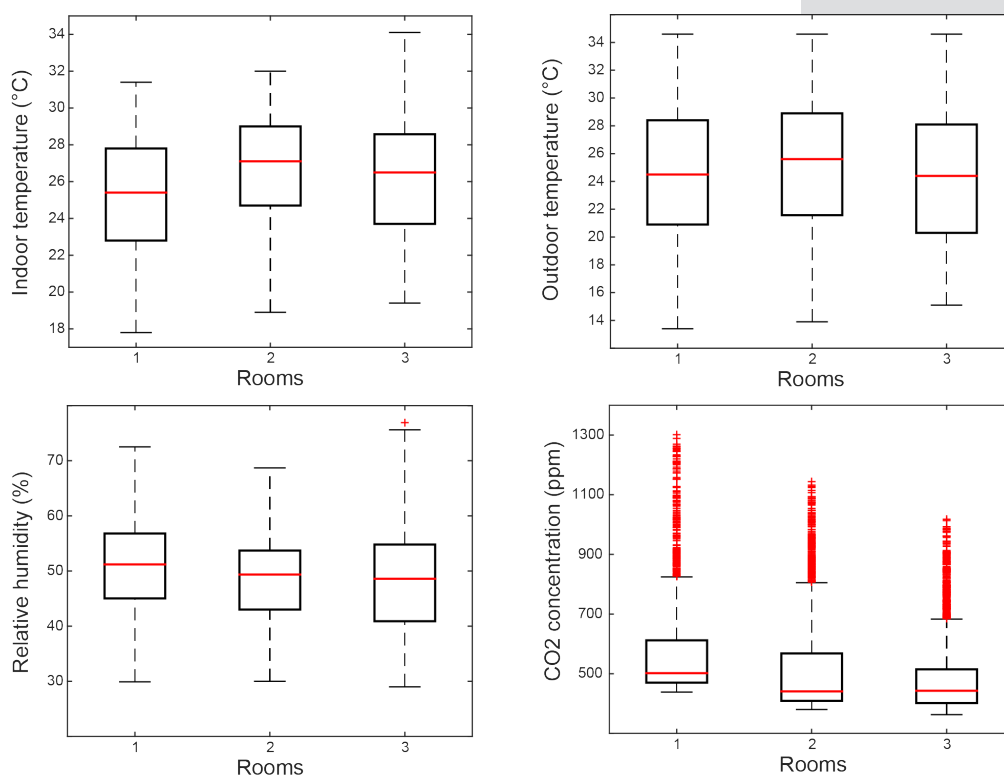


Figure 3. Analysis of the monitored parameters.

In order to assess the incidence of the daily routine, the windows opening and closing actions have been analysed according to the “time of the day” in which they occurred. The intervals considered are the arrival in the office, the intermediate period of stay and the departure. The arrival and departure periods coincide, respectively, with the first and last 20 minutes of occupation (2 time-steps). Figure 4 shows the percentage frequency of openings (Figure 4-a) and closures (Figure 4-b) for the three rooms and the total one. More than

condizioni di qualità dell'aria indoor. Nonostante ciò, sono numerosi gli eventi caratterizzati da concentrazioni maggiori di 1000 ppm. Al fine di valutare l'incidenza della routine giornaliera, le azioni di apertura e chiusura delle finestre sono state analizzate in funzione del “periodo del giorno” nel quale si sono verificate. Gli intervalli considerati sono: l'arrivo nell'ufficio, il periodo intermedio di permanenza e la partenza. I periodi di arrivo e partenza coincidono rispettivamente con i primi e gli ultimi 20 minuti di occupazione (2 time-steps). La Figura 4 mostra

65% of the events are linked to a specific time of day: the openings are more frequent upon arrival, while most of the closures take place at the departure. According to the literature [37], the actions in the intermediate periods are less usual because the stay in the same environment makes people adapt to the indoor conditions. The patterns of interaction found in this case study are congruent with the results reported by previous investigations, even if related to different climatic contexts [18,24].

la frequenza percentuale di aperture (Figura 4-a) e chiusure (Figura 4-b) per le tre stanze e quella totale. Oltre il 65% delle azioni è legato a uno specifico momento della giornata: le aperture sono più frequenti all'arrivo, mentre la maggior parte delle chiusure avviene alla partenza. Similmente a quanto riportato in letteratura [37], le azioni nei periodi intermedi sono meno usuali perché la permanenza nello stesso ambiente fa adattare le persone alle condizioni interne. I pattern di interazione riscontrati in questo caso di studio sono congruenti

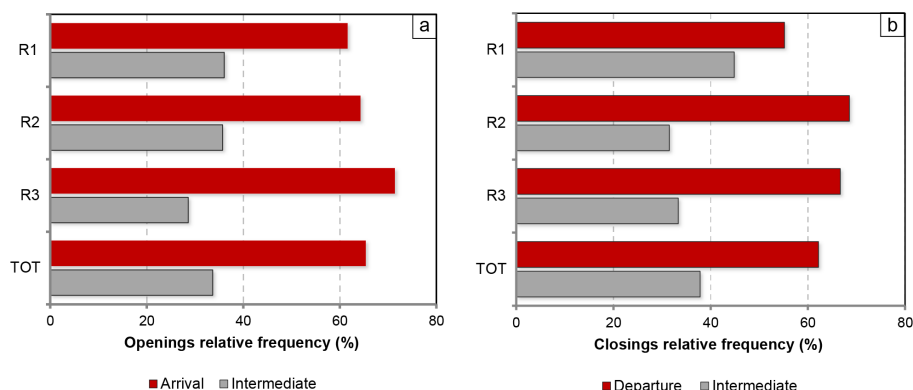


Figure 4. Relative frequency of a) openings and b) closings in relation to different periods.

The behavioural models of windows opening and closing have been developed using logistic regression methods on experimental data. The analysis of the literature (reported in Section 2) and the evaluations of the monitored data allowed the identification of the parameters with the greatest influence on the occupants' behaviour. The indoor and outdoor temperatures turned out to be the main drivers for the windows interaction [11,12]. Thus, these parameters were selected as independent variables for both the correlations. The CO₂ concentration was not counted among the predictor parameters because the largest number of openings occurred at the first entry when the CO₂ was minimal. The closing actions taken at the departure have been excluded from the regression analysis since they are not triggered by users' discomfort perceptions.

Figure 5 shows, for each correlation, the coefficients estimated by the regression analysis (β_0 and β_1) and the three goodness-of-fit estimators. All correlations are statistically significant (p-value <0.001), so both the variables stimulate occupants' behaviours. Similarly to findings reported in previous case studies [12], the openings seem to be triggered mainly by the indoor temperature, while the closings by the outdoor one.

Figure 6 displays the obtained opening and closing models, in relation to the indoor and outdoor temperatures. Both the models related to the individual

con i risultati riportati da studi precedenti, anche se relativi a contesti climatici differenti [18,24].

I modelli comportamentali di apertura e chiusura delle finestre sono stati sviluppati utilizzando l'analisi in regressione logistica su dati sperimentali. Lo studio della letteratura (riportato nella Sezione 2) e l'analisi dei dati monitorati hanno permesso di identificare i parametri con maggiore influenza sul comportamento degli occupanti. La temperatura interna ed esterna sono stati riconosciuti come i principali drivers per l'interazione con le finestre [11,12]. Quindi, tali parametri sono stati selezionati come variabili indipendenti per entrambe le correlazioni. La concentrazione di CO₂ non è stata annoverata tra i parametri predittori poiché il maggior numero di aperture è avvenuto al primo ingresso quando la CO₂ era minima. Le azioni di chiusura avvenute alla partenza sono state escluse dall'analisi in regressione poiché non sono causate da sensazioni di discomfort degli utenti.

La Figura 5 riporta, per ogni correlazione, i coefficienti stimati dall'analisi in regressione (β_0 e β_1) e i tre parametri estimatori della bontà di adattamento. Tutte le correlazioni risultano statisticamente significative (p-value <0.001), quindi entrambe le variabili stimolano i comportamenti degli occupanti. Similmente a quanto evidenziato in altri casi di studio [12], le aperture sembrano essere maggiormente stimolate dalla temperatura interna, mentre le chiusure da quella esterna.

La Figura 6 mostra graficamente i modelli di apertura e chiusura ottenuti,

Correlation	β_0	β_1	p-value	AUC	R ² McFadden	R ² Naglekerke
OPENINGS						
Indoor Temp._R1	-14,6	0,53	0,000	0,84	0,27	0,35
Indoor Temp._R2	-31,1	1,13	0,000	0,96	0,54	0,60
Indoor Temp._R3	-14,4	0,47	0,000	0,84	0,26	0,31
Indoor Temp._TOT	-15,5	0,53	0,000	0,85	0,28	0,34
Outdoor Temp._R1	-10,1	0,38	0,000	0,81	0,25	0,32
Outdoor Temp._R2	-15,1	0,55	0,000	0,85	0,34	0,39
Outdoor Temp._R3	-9,06	0,30	0,000	0,78	0,17	0,21
Outdoor Temp._TOT	-10,4	0,37	0,000	0,81	0,23	0,28
CLOSINGS						
Indoor Temp._R1	10,5	-0,57	0,000	0,81	0,15	0,16
Indoor Temp._R2	8,1	-0,41	0,000	0,85	0,17	0,18
Indoor Temp._R3	15,7	-0,82	0,000	0,80	0,14	0,15
Indoor Temp._TOT	9,5	-0,53	0,000	0,81	0,13	0,14
Outdoor Temp._R1	5,7	-0,40	0,000	0,86	0,21	0,22
Outdoor Temp._R2	5,8	-0,41	0,000	0,81	0,20	0,21
Outdoor Temp._R3	1,5	-0,26	0,000	0,75	0,09	0,10
Outdoor Temp._TOT	3,97	-0,35	0,000	0,82	0,16	0,17

Figure 5. Regression coefficients and goodness-of-fit estimators.

rooms and the total one (derived from the analysis of the entire sample) are presented. All the opening models have a sigmoidal shape, in which the probability of occurrence increases as the temperature increases. In general, the probability becomes significant for indoor temperatures higher than 26 °C and for outdoor temperatures greater than 25 °C. The opening probability exceeds the 80% (almost certain action) for temperatures between 29 °C and 34 °C. In the total model (solid black line) the T50 (i.e. the temperature for which half of the sample opens the window) is equal to 30 °C for the indoor one and is about 28 °C for the outdoor one.

The probabilistic models for windows closing have a decreasing trend as the temperature increases. The probability of occurrence calculated with the outdoor temperature reaches values much lower than the internal one (about 15% against 60%). In general, the probability of closure is lower than for openings because the high summer temperatures reduce the need to preserve the indoor environmental conditions by closing the windows. In fact, as previously shown in Figure 4, users close the windows mainly when they leave the offices.

Although characterised by fairly similar environmental conditions, the comparisons between the three offices show that the users' behaviours are rather dissimilar. The models related to Rooms 1 and 2 present significant

in relazione alla temperatura interna e a quella esterna. Si riportano sia i modelli relativi alle singole stanze sia il modello totale, derivato dall'analisi dell'intero campione. Tutti i modelli di apertura presentano un andamento sigmoidale, nel quale la probabilità di accadimento aumenta al crescere della temperatura. In generale, la probabilità diventa significativa per temperature interne superiori a 26 °C e per temperature esterne maggiori di 25 °C. La probabilità di apertura supera l'80% (azione quasi certa) per temperature comprese tra 29 °C e 34 °C. Nel modello totale (linea nera continua) la T50, cioè la temperatura per la quale metà del campione apre la finestra, è pari a 30 °C per quella interna ed è circa 28 °C per quella esterna.

I modelli probabilistici di chiusura delle finestre hanno un andamento decrescente al crescere della temperatura. La probabilità di accadimento calcolata con la temperatura esterna raggiunge valori nettamente inferiori rispetto a quella interna (circa 15% contro 60%). In generale, la probabilità di chiusura è molto minore di quella relativa alle aperture perché le alte temperature estive riducono la necessità di preservare le condizioni climatiche interne chiudendo le finestre. Infatti, come mostrato in precedenza in Figura 4, gli utenti chiudono le finestre prevalentemente quando devono lasciare l'ambiente. Sebbene siano caratterizzati da condizioni ambientali abbastanza simili, i confronti fra i tre uffici evidenziano che i comportamenti sono piuttosto dissimili. I modelli differiscono sensibilmente tra le

differences, even if the geometric and exposure conditions are the same. On the contrary, Rooms 1 and 3 appear to have very similar behaviours. This result underlines that despite the environmental and time-related conditions have a considerable weight on people's behaviour, even their personal preferences and thermal sensations play a key role in the interaction with the building.

Stanze 1 e 2 anche se le condizioni geometriche e di esposizione sono le medesime. Al contrario, le Stanze 1 e 3 sembrano avere comportamenti molto simili. Questo risultato sottolinea che, nonostante le condizioni climatiche e temporali abbiano un peso notevole sul comportamento delle persone, anche le loro personali preferenze e sensazioni termiche hanno un ruolo cardine nell'interazione con l'edificio.

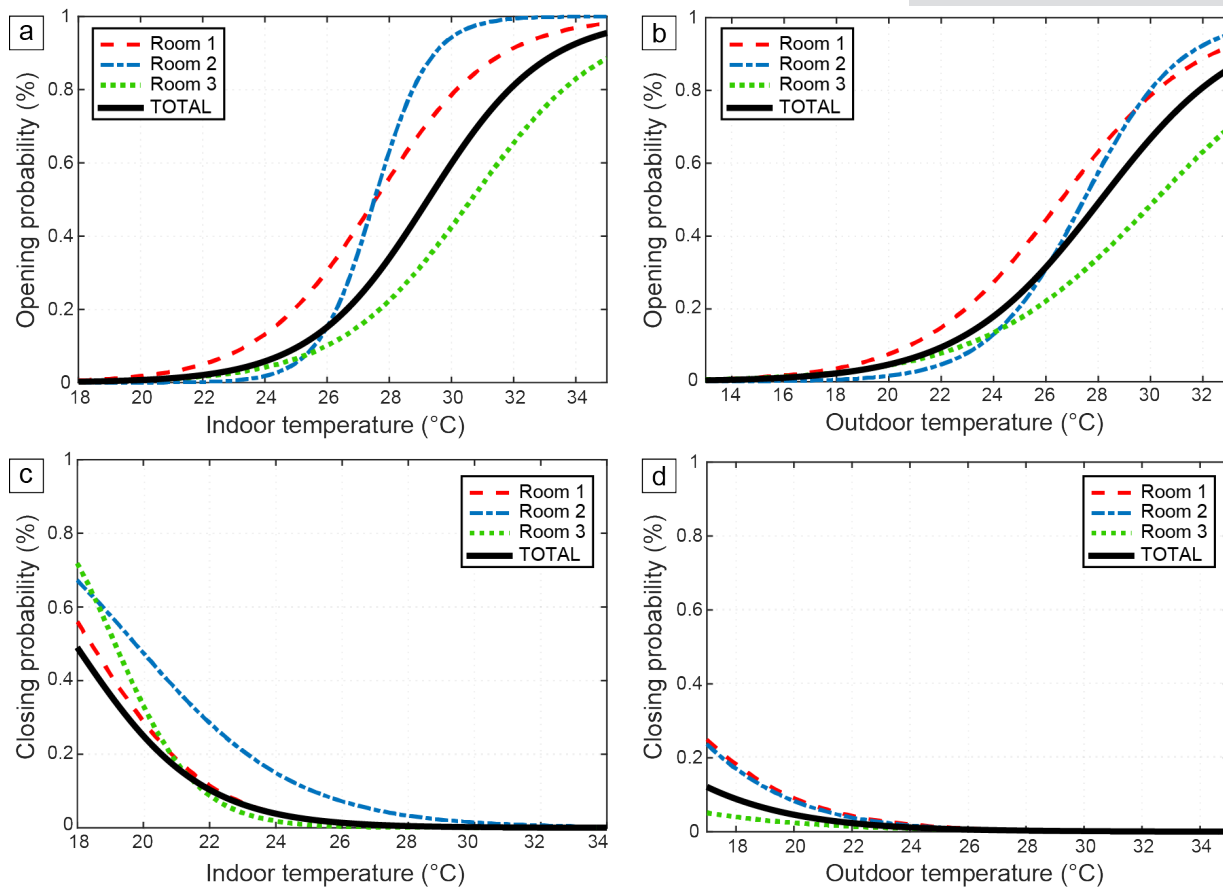


Figure 6. Behavioural models for the three rooms and the total one for a-b) window opening and c-d) window closing.

5. CONCLUSIONS

The present study aimed at examining the interaction between the users and the building, in order to develop stochastic behavioural models. In particular, the windows opening and closing behaviours have been investigated in three offices located in the Mediterranean climate (Ancona). A three-months monitoring during the summer season allowed a continuously recording of occupancy, environmental parameters and adaptive actions. The opening and closing behaviours have been correlated both to the time of the day (arrival, intermediate periods and departure) and to environmental parameters (indoor and outdoor temperature). Furthermore, window opening and closing models have been developed through logistic regression analyses.

The results suggest a typical users-windows pattern. In fact, openings and

5. CONCLUSIONI

Il presente studio si è posto l'obiettivo di esaminare l'interazione tra utenti ed edificio, al fine di sviluppare modelli comportamentali stocastici. In particolare, sono state studiate le aperture e chiusure delle finestre in tre uffici collocati in una zona con clima di tipo mediterraneo (Ancona). Un monitoraggio trimestrale durante la stagione estiva ha permesso di acquisire continuamente l'occupazione, i parametri ambientali e le azioni adattive. I comportamenti di apertura e chiusura sono stati correlati sia al periodo del giorno (arrivo, intermedio, partenza), sia ai parametri ambientali (temperatura interna ed esterna). Inoltre, sono stati sviluppati modelli di apertura e chiusura delle finestre, attraverso l'analisi in regressione logistica. I risultati suggeriscono un pattern tipico di interazione tra utenti e finestre. Infatti, le aperture e le chiusure tendono a essere più frequenti rispettivamente all'arrivo e alla partenza; mentre lo stato della

closings tend to be more frequent on arrival and departure, respectively; while the status of the window tends to remain unchanged during the stay.

These actions are also influenced by environmental changes. In particular, the indoor temperature seems to influence especially the openings while the outdoor temperature the closing actions. The dual influence of the environmental and temporal components is in line with outcomes reported in previous studies, although related to different climatic contexts. Even with very similar boundary conditions, the behavioural models differ significantly between each other. This observation highlights that to develop realistic behavioural models it is of primary importance to integrate both objective, such as environmental and temporal elements, and subjective factors, that is the personal perceptions and preferences of the occupants. The proposed results offer new knowledge on the interaction between users and windows in the Mediterranean climate and provide suggestions for the development of stochastic behavioural models.

Future developments in the field of the European project aim at analysing different types of actions (e.g. lights, thermostat) and at including additional air quality indicators (e.g. volatile organic compounds (VOC), particulate matter (PM10), formaldehyde (HCHO)) to improve the knowledge about the motivations that triggers the users to interact with the building. In addition, the investigation of the subjective component and, in particular, the perceived environmental quality could be useful for comparisons, even economic, between environments with natural and mechanical ventilation.

A subsequent target aims at implementing the models in energy simulation tools in order to consider the human component during the simulation process. This dynamic interaction will improve the validity of the results and reduce the gap between real and expected energy consumptions. Furthermore, by enhancing the simulation tools, the design team will have additional benefits. In fact, by comparing different strategies of intervention, the designers will be guided towards the optimal choice both from energy and indoor comfort points of view.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This research has received funding from the NewTREND (New integrated methodology and Tools for Retrofit design towards a next generation of ENergy efficient and sustainable buildings and Districts) project (<http://newtrend-project.eu/>) under the Horizon 2020 research and innovation programme (GA no. 680474).

finestra tende a rimanere invariato durante la permanenza. Queste azioni sono influenzate anche dalle variazioni ambientali. In particolare, la temperatura interna sembra condizionare particolarmente le aperture mentre quella esterna le chiusure. La duplice influenza delle componenti ambientale e temporale è in linea con i risultati proposti da studi precedenti, sebbene relativi a contesti climatici differenti. Pur con condizioni al contorno molto simili, i modelli comportamentali ottenuti nei relativi ambienti differiscono sensibilmente. Tale osservazione evidenzia che per sviluppare modelli comportamentali realistici è necessario integrare sia fattori oggettivi, come quelli ambientali e temporali, sia fattori soggettivi, cioè le personali percezioni e preferenze degli occupanti. I risultati proposti offrono nuove conoscenze in merito all'interazione tra utenti e finestre nel clima mediterraneo e forniscono spunti per lo sviluppo di modelli comportamentali stocastici. I futuri sviluppi nell'ambito del progetto europeo mirano a un'analisi di differenti tipi di azioni (ad es. luci, termostato) e a includere ulteriori indicatori di qualità dell'aria (ad es. composti organici volatili (VOC), materiale particolato (PM10), formaldeide (HCHO)) per migliorare la conoscenza in merito alle motivazioni che spingono gli utenti a interagire con l'edificio. Inoltre, indagare la componente soggettiva e, in particolar modo, la qualità ambientale percepita dagli utenti potrà essere propedeutica per un confronto, anche economico, tra ambienti dotati di ventilazione naturale e meccanica. Un successivo target si propone di implementare i modelli nei tools di simulazione energetica al fine di considerare la componente umana durante il processo di simulazione. Tale interazione dinamica consentirà di migliorare la validità dei risultati e di ridurre il gap tra consumi energetici reali e previsti. Inoltre, potenziando gli strumenti di simulazione, il team di progettazione trarrà notevoli benefici. Infatti, confrontando differenti strategie di intervento, i progettisti saranno guidati verso la scelta ottimale sia da un punto di vista energetico sia di comfort indoor.

6. RINGRAZIAMENTI

La presente ricerca ha ricevuto i finanziamenti del progetto europeo NewTREND (New integrated methodology and Tools for Retrofit design towards a next generation of ENergy efficient and sustainable buildings and Districts), parte del programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 (GA no.680474).

7. REFERENCES

- [1] WBCSD, Energy efficiency in buildings PPP: multi-annual roadmap and longer- term strategy, Technical Report, 2010. doi:10.2777/10074.
- [2] Parliament of the European Union, Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of building (recast), 2010.
- [3] D. D'Agostino, P. Zangheri, B. Cuniberti, D. Paci, P. Bertoldi, Synthesis Report on the National Plans for Nearly Zero Energy Buildings (NZEBs); EUR 27804 EN, 2016. doi:10.2790/659611.
- [4] P. De Wilde, The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation, *Autom. Constr.* 41 (2014) 40–49. doi:10.1016/j.autcon.2014.02.009.
- [5] H. Poirazis, Å. Blomsterberg, M. Wall, Energy simulations for glazed office buildings in Sweden, *Energy Build.* 40 (2008) 1161–1170. doi:10.1016/j.enbuild.2007.10.011.
- [6] R.V. Andersen, B. Olesen, J. Toftum, Simulation of the Effects of Occupant Behaviour on Indoor Climate and Energy Consumption, *Clima 2007 WellBeing Indoors.* (2007) 7.
- [7] IEA, Annex 53 Task Force, Final Report, Total energy use in residential buildings - The Modeling and Simulation of Occupant Behavior, 2012. http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf.
- [8] D. Majcen, L.C.M. Itard, H. Visscher, Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications, *Energy Policy.* 54 (2013) 125–136. doi:10.1016/j.enpol.2012.11.008.
- [9] D. Yan, W. O'brien, T. Hong, X. Feng, H.B. Gunay, F. Tahmasebi, A. Mahdavi, Occupant behavior modeling for building performance simulation: current state and future challenges, *Energy Build.* 107 (2015) 264–278. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.032.
- [10] T. Hong, J. Langevin, K. Sun, Building Simulation: Ten Challenges, *Build. Simul.* (2018). doi:10.1007/s12273-018-0444-x.
- [11] [K. Schakib-Ekbatan, F.Z. Çakıcı, M. Schweiker, A. Wagner, Does the occupant behavior match the energy concept of the building? – Analysis of a German naturally ventilated office building, *Build. Environ.* 84 (2015) 142–150. doi:10.1016/j.buildenv.2014.10.018.
- [12] F. Haldi, D. Robinson, Interactions with window openings by office occupants, *Build. Environ.* 44 (2009) 2378–2395. doi:10.1016/j.buildenv.2009.03.025.
- [13] N. Li, J. Li, R. Fan, H. Jia, Probability of occupant operation of windows during transition seasons in office buildings, *Renew. Energy.* 73 (2015) 84–91. doi:10.1016/j.renene.2014.05.065.
- [14] F. Stazi, F. Naspi, M. D'Orazio, A literature review on driving factors and contextual events influencing occupants' behaviours in buildings, *Build. Environ.* 118 (2017) 40–66. doi:10.1016/j.buildenv.2017.03.021.
- [15] S. Barlow, D. Fiala, Occupant comfort in UK offices-How adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies, *Energy Build.* 39 (2007) 837–846. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.002.
- [16] L. Wang, S. Greenberg, Window operation and impacts on building energy consumption, *Energy Build.* 92 (2015) 313–321. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.060.
- [17] F. Yousefi, Y. Gholipour, W. Yan, A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data, *Energy Build.* 148 (2017) 182–198. doi:10.1016/j.enbuild.2017.04.085.
- [18] Y. Zhang, P. Barrett, Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building, *Build. Environ.* 50 (2012) 125–134. doi:10.1016/j.buildenv.2011.10.018.
- [19] B. Jeong, J.-W. Jeong, J.S. Park, Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings, *Energy Build.* 127 (2016) 206–216. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.097.
- [20] D. Cali, R.K. Andersen, D. Müller, B. Olesen, Analysis of occupants' behavior related to the use of windows in German households, *Build. Environ.* 103 (2016) 54–69. doi:10.1016/j.buildenv.2016.03.024.
- [21] S. Herkel, U. Knapp, J. Pfafferott, Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings, *Build. Environ.* 43 (2008) 588–600. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.031.
- [22] R. Fritsch, a. Kohler, M. Nygård-Ferguson, J.-L. Scartezzini, A stochastic model of user behaviour regarding ventilation, *Build. Environ.* 25 (1990) 173–181. doi:10.1016/0360-1323(90)90030-U.
- [23] F. Naspi, M. Arnesano, L. Zampetti, F. Stazi, G.M. Revel, M. D'Orazio, Experimental study on occupants' interaction with windows and lights in Mediterranean offices during the non-heating season, *Build. Environ.* 127 (2018) 221–238. doi:10.1016/j.

- buildenv.2017.11.009.
- [24] G.Y. Yun, K. Steemers, Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer, *Build. Environ.* 43 (2008) 1471–1482. doi:10.1016/j.buildenv.2007.08.001.
- [25] J. Von Grabe, The systematic identification and organization of the context of energy-relevant human interaction with buildings - A pilot study in Germany, *Energy Res. Soc. Sci.* 12 (2016) 75–95. doi:10.1016/j.erss.2015.12.001.
- [26] W. O'Brien, H.B. Gunay, The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices - A review and proposed modeling framework, *Build. Environ.* 77 (2014) 77–88. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.024.
- [27] G.Y. Yun, P. Tuohy, K. Steemers, Thermal performance of a naturally ventilated building using a combined algorithm of probabilistic occupant behaviour and deterministic heat and mass balance models, *Energy Build.* 41 (2009) 489–499. doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.013.
- [28] H.B. Gunay, W. O'Brien, I. Beausoleil-Morrison, R. Goldstein, S. Breslav, A. Khan, Coupling stochastic occupant models to building performance simulation using the discrete event system specification formalism, *J. Build. Perform. Simul.* 7 (2014) 457–478. doi:10.1080/19401493.2013.866695.
- [29] H.B. Gunay, W.O. Brien, I. Beausoleil-Morrison, A toolkit for developing data-driven occupant behaviour and presence models, in: *eSim, 2016*: p. paper 58. http://www.ibpsa.org/?page_id=662.
- [30] J.F. Nicol, Characterising occupant behavior in buildings: Towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds heaters and fans, *Seventh Int. IBPSA Conf.* (2001) 1073–1078.
- [31] R. V. Jones, A. Fuertes, E. Gregori, A. Giretti, Stochastic behavioural models of occupants' main bedroom window operation for UK residential buildings, *Build. Environ.* 118 (2017) 144–158. doi:10.1016/j.buildenv.2017.03.033.
- [32] H.B. Rijal, P.G. Tuohy, M. Humphreys, J.F. Nicol, A.A. Samuel, J. Clarke, Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings, *Energy Build.* 39 (2007) 823–836. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.003.
- [33] H.B. Gunay, W. O'Brien, I. Beausoleil-Morrison, A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices, *Build. Environ.* 70 (2013) 31–47. doi:10.1016/j.buildenv.2013.07.020.
- [34] F. Stazi, F. Naspi, M. D'Orazio, Modelling window status in school classrooms. Results from a case study in Italy, *Build. Environ.* 111 (2017) 24–32. doi:10.1016/j.buildenv.2016.10.013.
- [35] F. Haldi, D. Robinson, Modelling occupants' personal characteristics for thermal comfort prediction, *Int. J. Biometeorol.* 55 (2011) 681–694. doi:10.1007/s00484-010-0383-4.
- [36] ISO, 7730:2006 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2006.
- [37] A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, U. Dietrich, S. Busching, A review of occupant control on natural ventilation, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 1001–1013. doi:10.1016/j.rser.2009.11.005.