

Windows use in school buildings: findings on the influence of occupants' actions

Federica Naspi*, Francesca Stazi, Marco D'Orazio

Highlights

Window use in school environment was investigated through a monitoring campaign, recording occupancy, environmental parameters and users' adaptive actions.

Indoor and outdoor temperatures are the main driving factors for window opening and closing. Window use is also deeply influenced by daily routine and occupants' habits.

Behavioural models to predict window status were developed using linear and logistic regression analysis.

Abstract

Occupants usually interact with windows to restore their thermal comfort but in spaces densely occupied, as in schools, windows also are fundamental to achieve good IAQ and avoid health hazards. Many researchers investigated the user-window interaction to identify recurring patterns but such surveys in schools are lacking. This paper investigates this relationship in an Italian classroom, monitoring occupancy, environmental parameters and adaptive actions. The proposed behavioural models are driven by indoor and outdoor temperature since they have been identified as the triggers parameters for opening and closing actions.

Keywords

Adaptive actions, Behavioural models, Schools, Window-user interaction, Regression analyses

1. INTRODUCTION

Building energy efficiency improvement is one of the main targets to decrease energy consumptions [1]. The physical component (e.g. building materials) is the primary focus of the most adopted approaches, which treat the correlations between such elements and the final users adopting a schematic and “a priori” approach [2],[3]. In particular, the adoption of a “standard” criterion to simulate occupancy patterns and users' actions inside buildings caused relevant gaps between predicted and actual building performances [4],[5]. In fact, energy simulation software usually adopt standard schedule to include the human component in the assessment phase; for example, window opening occurs only when the indoor temperature overcomes a fixed limit and it is higher than the outdoor one [6]. Unfortunately, occupants do not act in a deterministic way, since their behaviours have a stochastic nature [7].

Federica Naspi

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche, 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 D'Orazio

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche, Ancona, 60131,
Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-071-220-4246;
fax: +39-071-220-4582;
e-mail: f.naspi@staff.univpm.it

For these reasons, many studies focused on the interaction between users and building devices, in order to develop behavioural models that could realistically predict users' actions [8]. Among the patterns, the one concerning window use has been one of the most studied because the users frequently intervene on windows and for the impact this action has on thermal comfort and energy consumptions [9]. Occupants interact with windows to restore their favourite comfort sensation. Nevertheless, in high-occupied spaces, as for schools, a careful window use is essential to preserve an adequate indoor air quality (IAQ) and to decrease health hazards [10],[11]. The students, in particular, spend at least one-third of their day at school and they need a healthy environment to increase their attention and productivity. Therefore, the development of a model that considers their perceptions and needs (concretized in the actions they take) is of primary importance.

In such research field, the present paper concerns the study of window-user interaction in school buildings. The analysis allowed to identify the action frequency in relation to specific time intervals and trigger parameters (i.e. the drivers), to evaluate the statistical meaning of the identified correlations and to propose behavioural models to predict users' actions.

2. STATE OF THE ART

Many researchers tried to identify the event and the parameters that trigger users' actions on windows. Such analyses have been carried out especially in relation to two building typologies: offices and residential buildings. Although it was identified that openings and closings are performed for thermal and IAQ requirements, whether the most influencing parameters are the indoor or outdoor ones has not been assessed yet. In fact, on one hand, outdoor parameters are independent of occupants' actions, on the other hand, indoor parameters are those perceived by the users that work and live in indoor spaces [12]. In relation to offices, some researchers affirm that the main environmental driver is outdoor temperature [13],[14]. Haldi and Robinson [15], investigating the influence of both occupants' presence and environmental parameters, evaluated that indoor conditions were the best describers for opening actions, while outdoor parameters triggered closings. Other researchers [16],[17] confirmed such results, highlighting that indoor and outdoor temperature are the main window drivers. Findings in residential buildings are similar to offices. Indoor and outdoor temperature are the key parameters [18],[19] but also the CO₂ concentration is an influencing parameter [20]–[22].

Window-user interaction is also a function of specific events related to the time

1. INTRODUZIONE

Il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici è uno dei principali obiettivi per la diminuzione dei consumi energetici [1]. Gli approcci comunemente proposti si focalizzano prevalentemente sulla componente fisica (ad es. materiali edili) e trattano le interrelazioni tra tali elementi e i reali fruitori degli ambienti con un approccio schematico e "a priori" [2],[3]. In particolare, l'adozione di un criterio "standard" per simulare l'occupazione e le azioni delle persone all'interno degli edifici ha causato enormi differenze tra le performance attese e quelle in esercizio degli edifici [4],[5]. Infatti, i software di simulazione energetica sono soliti utilizzare schedule standard per considerare la componente umana nella fase di calcolo; ad esempio l'apertura delle finestre avviene solo quando la temperatura interna supera una certa soglia e quando è maggiore di quella esterna [6]. Gli utenti, tuttavia, non agiscono in maniera deterministica ma la natura dei loro comportamenti è di tipo stocastico [7]. Per questi motivi, numerose ricerche sono state incentrate sullo studio dell'interazione tra gli utenti e i sistemi dell'edificio, al fine di ottenere modelli comportamentali che realisticamente prevedessero le azioni degli occupanti [8]. Tra i numerosi pattern, l'apertura e la chiusura delle finestre è stato uno dei più studiati, sia perché gli utenti intraprendono frequentemente tale azione, sia per l'impatto sul comfort termico e sui consumi energetici [9]. Gli utenti interagiscono con le finestre per ristabilire la sensazione di comfort termico. Tuttavia, in ambienti con elevata occupazione, come le scuole, un accurato utilizzo delle finestre è fondamentale per mantenere adeguati livelli di qualità dell'aria interna (IAQ) e per diminuire il rischio di contrarre malattie respiratorie [10],[11]. Gli studenti, in particolare, trascorrono circa un terzo della loro giornata a scuola e necessitano di un ambiente salubre per aumentare l'attenzione e la produttività, quindi lo sviluppo di un modello che tenga in considerazione le loro percezioni e necessità, concretizzate nelle azioni che intraprendono, risulta di primaria importanza.

All'interno di questo ambito di ricerca, il presente articolo propone lo studio dell'interazione tra utenti e finestre in ambiente scolastico. L'analisi ha permesso di identificare la frequenza delle azioni in relazione a specifici intervalli temporali e i parametri scatenanti (i drivers), di valutare la significatività delle correlazioni individuate e di proporre modelli comportamentali di previsione delle azioni.

2. STATO DELL'ARTE

Molti ricercatori si sono focalizzati sulla comprensione di quali fossero gli eventi e i parametri che stimolano le azioni di apertura e chiusura delle finestre. Tali analisi sono state eseguite soprattutto in relazione a due tipologie di edificio: gli uffici e le residenze. Sebbene sia stato identificato che aperture e chiusure vengono eseguite per far fronte a esigenze termiche e di IAQ, non è stato ancora valutato se i parametri

of the day and to occupants' routine. In offices, in fact, most of the openings occur at the first entrance in the room or after the lunch break [22],[23], while closing actions are strictly connected to departures [24]. During intermediate periods, window status is usually left unchanged, since people tend to adapt to indoor conditions [25]. Even in residential buildings correlations between time of the day and windows status have been identified [18],[20]. Status changes occur frequently in the morning and in the evening because they are triggered by specific activities (e.g. cooking).

In school building such analyses are limited: only one survey highlighted a significant correlation between openings and indoor temperature [26]. Figure 1 summarises the finding of the aforementioned studies: the papers are listed in relation to the building typology (at first offices, then the residences and finally the schools) and in chronological order (from 1990 to 2016).

più influenti siano quelli interni o quelli esterni. Infatti, se da una parte i parametri esterni sono indipendenti dalle azioni che compiono gli utenti, dall'altra i parametri interni sono quelli effettivamente percepiti dagli utenti che fruiscono gli ambienti indoor [12]. In relazione agli uffici, alcuni ricercatori sostengono che il principale parametro scatenante sia la temperatura esterna [13],[14]. Haldi e Robinson [15], indagando l'influenza sia della presenza delle persone sia dei parametri ambientali, hanno osservato come le condizioni interne fossero i descrittori migliori per le azioni di apertura, mentre i parametri esterni avessero un'influenza maggiore sulle azioni di chiusura. Altri ricercatori [16],[17] hanno confermato tali risultati, evidenziando che la temperatura interna ed esterna sono i parametri che maggiormente incidono sull'utilizzo delle finestre. Negli edifici residenziali sono stati ottenuti risultati simili a quelli riguardanti gli uffici. Temperatura interna ed esterna

Autori / anno	Luogo	Tipologia di edificio	Durata del monitoraggio	Drivers per l'apertura	Drivers per la chiusura
Fritsch <i>et al.</i> (1990) [25]	UK	15 uffici	Mar. 1996 – Set. 1997	Temperatura interna; Temperatura esterna.	Temperatura interna; Temperatura esterna.
Yun e Steemers (2008) [24]	UK	6 uffici	Giu. – Set. 2006	Temperatura interna; Ora del giorno.	Temperatura interna; Ora del giorno.
Haldi e Robinson (2009) [15]	Svizzera	14 uffici un edificio per uffici	Dic. 2001–Nov. 2008	Temperatura interna.	Temperatura esterna.
Zhang e Barrett (2012) [23]	UK	36 uffici modulari	Gen. 2005 – Apr. 2006	Temperatura esterna.	–
Wei <i>et al.</i> (2013) [14]	UK	16 uffici (1/2 occupanti)	3 periodi (dal 20 Lug. 2010 al 20 Nov. 2011)	Stagione; Temperatura esterna. Temperatura interna.	Stagione; Temperatura esterna. Temperatura interna.
D'Oca e Hong (2014) [16]	Germania	5 uffici (1-6 occupanti)	Database Annex 53	Temperatura esterna; Temperatura interna; Ora del giorno.	Ora del giorno; Temperatura esterna.
Li <i>et al.</i> (2015) [13]	Cina	16 uffici (1/2 occupanti)	Sett. –Ott. 2012	Temperatura esterna	–
Schakib-Ekbatan <i>et al.</i> (2015) [17]	Germania	15 residenze	Gen. 2004- Dic. 2009	Temperatura interna; Temperatura esterna.	Temperatura interna; Temperatura esterna.
Fabi <i>et al.</i> (2012) [22]	Danimarca	2 residenze – 1 studentato	Gen. –Ago. 2008	Concentrazione di CO ₂ ; Temperatura esterna.	Temperatura esterna.
Schweiker <i>et al.</i> (2012) [19]	Svizzera – Giappone	15 residenze	6 mesi – 2007/2008	Temperatura esterna; Temperatura interna.	Temperatura esterna; Temperatura interna.
Andersen <i>et al.</i> (2013) [21]	Danimarca	60 appartamenti identici	Gen. –Ago. 2008	Concentrazione di CO ₂ . Ora del giorno; Concentrazione di CO ₂ ; Temperatura interna; Temperatura esterna media giornaliera.	Temperatura esterna. Temperatura esterna media giornaliera; Ora del giorno; Temperatura interna
Cali <i>et al.</i> (2016) [20]	Germania	20 unità immobiliari	1 anno (2012)	Ora del giorno; Temperatura esterna.	Ora del giorno; Temperatura interna.
Jeong <i>et al.</i> (2016) [18]	Corea	27 scuole	Dic. 2014 – Mag. 2015	Temperatura interna.	–
Santamouris <i>et al.</i> (2008)[26]	Grecia		2003–2007		

Figure 1. Recap of the studies related to window-user interaction, divided according to the building typology.

Behavioural models are developed on the basis of correlations between drivers, as environmental variables, and specific actions. The adopted mathematical model must fit the experimental data and it must not permit physical impossibilities (e.g. probability greater than 1). Several researchers [27],[28] proposed the adoption of a linear correlation model, in order to

risultano essere i parametri cardine [18],[19] ma un'incidenza notevole è stata riscontrata anche in relazione alla concentrazione di CO₂ [20]–[22]. L'interazione tra utenti e finestre negli edifici è anche funzione di specifici eventi legati all'ora del giorno e alla routine degli occupanti. Negli uffici, infatti, la maggior parte delle aperture avviene al primo ingresso o dopo la pausa pranzo [22],[23], mentre le

evaluate the probability of the adaptive action as a function of one or more drivers. The following equation shows the linear relationship between the output and the predictors:

$$p_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_n x_{n,i} \quad (1)$$

where p_i is the action occurrence probability (e.g. window opening), β is the vector of regression coefficients and x is the vector of the drivers (e.g. indoor temperature). Nevertheless, when the output variable is a dichotomous one (e.g. 0=window closed e 1=window open), logistic regression analysis is applied [15],[29]. Logistic regression is usually preferred to linear one because the occurrence probability p_i cannot assume values outside the range [0,1]; moreover, upper and lower bounds are predicted with more accuracy [13]. Using this approach, the probability distribution is named logit and is defined as follow:

$$\text{logit}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_n x_{n,i} \quad (2)$$

Such analysis allows predicting the probability that the output variable p_i assumes the “true value”, usually fixed at one for the window status “open” and zero for “close”. Such method has been widely adopted in many of the aforementioned studies [13],[16],[23], while it was never developed for school buildings.

3. METHODOLOGY

The survey started with an experimental monitoring phase for the data collection and the observation of users' behaviours. The recorded data were analysed and results were statistically evaluated and compared to previous findings from the literature. The survey's phases are reported below:

- 1) Experimental phase: recording of environmental parameters (both indoor and outdoor) and monitoring occupancy patterns, students daily routine and actions on windows;
- 2) Data processing: associating windows state with time of the day and environmental variables to assess which stimuli are the drivers for users' actions;
- 3) Analysis: using linear and logistic regression analysis to assess the influence of recorded parameters on windows state and employing goodness-of-fit estimators to evaluate the level of statistical significance of the correlations;
- 4) Interpretation: comparing results achieved in this paper to findings of previous studies carried out in different building uses to evaluate differences and similarities.

azioni di chiusura sono strettamente legate all'uscita dall'ambiente [24]. Nei periodi intermedi di permanenza, invece, lo stato delle finestre resta invariato, poiché le persone tendono ad adattarsi alle condizioni interne [25]. Anche negli edifici residenziali sono state evidenziate correlazioni tra specifici momenti del giorno e stato delle finestre [18],[20]. I cambi di stato più frequenti avvengono al mattino e la sera perché sono funzione di specifiche attività (ad es. cucinare). Negli edifici scolastici queste analisi sono limitate: un'unica campagna di ricerca ha evidenziato una correlazione significativa tra aperture e temperatura interna [26]. La Figura 1 riassume i risultati degli studi precedentemente citati: gli articoli sono riportati in relazione alla tipologia di edificio (prima gli uffici, poi le residenze e infine le scuole) e in ordine cronologico (dal 1990 al 2016). I modelli comportamentali vengono sviluppati sulla base di correlazioni tra i fattori scatenanti, come i parametri ambientali, e le specifiche azioni. Il modello matematico scelto deve fittare i dati sperimentali e non deve permettere impossibilità fisiche (ad es. un valore di probabilità maggiore di 1). Numerosi ricercatori [27],[28] hanno proposto l'adozione del modello di correlazione lineare, al fine di valutare la probabilità dell'azione adattiva in funzione di uno o più parametri predittori. La relazione lineare tra l'output e i predittori segue l'equazione seguente:

(1)

$$p_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_n x_{n,i}$$

Dove p_i è la probabilità di accadimento di un'azione (come l'apertura delle finestre), β è il vettore dei coefficienti in regressione e x è il vettore delle variabili predittori (ad es. la temperatura interna). Tuttavia, quando la variabile di output è di tipo dicotomico (ad es. 0=finestra chiusa e 1=finestra aperta), viene più comunemente utilizzata l'analisi in regressione logistica [15],[29]. Utilizzare la regressione logistica rispetto a quella lineare è preferibile, infatti, la probabilità di accadimento p_i non può assumere valori esterni all'intervallo [0,1]; inoltre è stato notato che i limiti superiore e inferiore vengono approssimati con maggiore accuratezza [13]. Con questo tipo di approccio, la distribuzione di probabilità assume il nome di distribuzione logit ed è definita nel modo seguente:

(2)

$$\text{logit}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_n x_{n,i}$$

Tale analisi consente di predire la probabilità che la variabile di output p_i assuma il “valore vero”, usualmente posto pari a uno per lo stato di finestra “aperta” e pari zero per lo stato di finestra “chiusa”. Questo metodo è stato ampiamente adottato in molti degli studi precedentemente citati [13][16][23], mentre non è stato ancora sviluppato per ambienti di tipo scolastico.

3. METODOLOGIA

La ricerca ha preso avvio con una fase di monitoraggio per la raccolta dei dati sperimentali e la contemporanea osservazione dei comportamenti degli studenti. I dati monitorati sono stati

The survey was carried out in a high school built in 2010 and located at Ancona (Latitude: 43°58'49"30 N; longitude: 13°52'57"01 E; altitude: 67 m). A single classroom placed at ground floor level was selected as a case study (sup: 55 m²): it has two double glazing windows in aluminium frame (casement plus hopper window on the top). The hopper windows are 190 cm long and 50 cm high, whereas each shutter of the operable casement is 80 cm long and 130 cm high. The classroom was occupied by 16 students of 14/15-years-old. Lessons were held from Monday to Friday; from 8:00 am to 2:00 pm., Students' presence in the classroom was highly variable along the week because they moved frequently from the classroom to the laboratories. The monitoring campaign was carried out from the 19th of March to the 29th of April 2015, amounting to 25 days of regular lesson. The heating system was switched on until the 16th of April (included), after this date the classroom was in a free-running condition. The following measurements were carried out according to ISO 7726:2002 [30]:

- Outdoor environmental conditions: outdoor air temperature, solar radiation, wind speed and direction were collected by a climate station ownership of Marche Civil Defence and located at about 1 km from the school;
- Indoor climate conditions: indoor air temperature, mean radiant temperature, air speed and CO₂ concentration were recorded by the datalogger Babuc/A.

The sensors were placed at about 1.1 m above the floor according to ISO 7726:2002 [30] for seated persons, in an almost central position. Real occupancy (i.e. number of students and teachers), adaptive actions (i.e. opening/closing door and windows) and contingent relevant events were daily noted by the supervisors. During the monitoring, the occupants could freely interact with the windows while the door was always closed, except for twenty minutes during the morning break and for a few minutes between lessons with different teachers. The monitoring allowed students' adaptive behaviour to be recorded and related to environmental parameters. Students' actions were accurately analysed in order to identify if occupants were influenced by the daily routine and to understand what kind of environmental parameters were the main triggers.

4. RESULTS

In the following sections, the main results are presented. At the beginning, a brief statistic of the recorded environmental parameters and the window opening/closing behaviours examination are reported. Then, results from linear and logistic regression analyses are presented.

analizzati e infine, i risultati ottenuti sono stati valutati statisticamente e confrontati con i precedenti risultati riportati in letteratura. Le fasi della ricerca vengono illustrate di seguito:

- 1) *Fase sperimentale: monitoraggio dei parametri ambientali (interni ed esterni), della presenza degli utenti, della routine giornaliera degli studenti e delle azioni sulle finestre;*
- 2) *Processamento dei dati: associazione dello stato delle finestre con il momento del giorno e con i parametri ambientali per valutare quali siano gli stimoli che scatenano le azioni degli utenti;*
- 3) *Analisi: utilizzo delle regressioni lineari e logistiche per stimare l'influenza dei parametri monitorati sullo stato delle finestre e impiego di vari estimatori della bontà di adattamento per valutare il livello di significatività statistica delle correlazioni;*
- 4) *Interpretazione: confronto tra i risultati ottenuti dai dati sperimentali e quelli di studi precedenti, svolti in edifici con altre destinazioni d'uso, per stimare differenze e somiglianze.*

La ricerca è stata svolta in una scuola superiore costruita nel 2010 e situata ad Ancona (Latitudine: 43°58'49"30 N; longitudine: 13°52'57"01 E; altitudine: 67 m). Come caso di studio è stata scelta un'aula collocata al piano terra (sup: 55 m²) caratterizzata da due finestre con doppio vetro e telaio in alluminio (composte da una doppia anta e da un vasistas nella parte superiore). Le finestre a vasistas misurano 190 cm di lunghezza e 50 cm di altezza, mentre ogni anta è larga 80 cm e alta 130 cm. Nella classe erano presenti 16 studenti di 14/15 anni. Le lezioni avevano luogo dal lunedì al venerdì, dalle 8:00 alle 14:00 ma la presenza degli studenti nell'aula era molto variabile durante la settimana, poiché spesso svolgevano attività nei laboratori.

La campagna di monitoraggio si è protratta dal 19 marzo al 29 aprile 2015, comprendendo 25 giorni di lezione. Il sistema di riscaldamento è rimasto in funzione fino al 16 aprile incluso, dopo di che la classe è stata ventilata in maniera naturale. I seguenti parametri sono stati misurati secondo la ISO 7726:2002 [30]:

- *Condizioni ambientali esterne: temperatura esterna, radiazione solare, velocità e direzione del vento sono state acquisite attraverso una stazione climatica proprietà della Protezione Civile delle Marche e collocata a circa 1 km dalla scuola;*
- *Condizioni climatiche interne: temperatura interna, temperatura media radiante, velocità dell'aria e concentrazione di CO₂ sono state acquisite tramite il datalogger Babuc/A.*

I sensori sono stati collocati a circa 1,1 m dal pavimento, secondo la ISO 7726:2002 [30] per persone sedute, in posizione centrale. I supervisori presenti nell'aula appuntavano quotidianamente: l'occupazione reale (il numero di studenti e insegnanti), le azioni adattive (aperture e chiusure di porta e finestre) ed eventuali circostanze contingenti. Durante il monitoraggio gli utenti potevano interagire liberamente con le finestre, mentre la porta veniva mantenuta

Figure 2 reports the recorded parameters, their variation range, the mean and the standard deviation.

chiusa ad eccezione di 20 minuti durante l'intervallo e di pochi minuti tra lezioni differenti. Il monitoraggio ha permesso di registrare le azioni

Variabili	Massimo	Minimo	Media	Deviazione Standard
Temperatura esterna (°C)	25.6	3.8	16.6	3.95
Radiazione solare (W/m ²)	993	0.0	501.8	269.6
Velocità del vento (m/s)	9.6	0.0	2.3	1.85
Temperatura interna (°C)	23.1	15.2	21.1	0.99
Temperatura media radiante (°C)	22.8	16.1	20.6	0.96
Velocità dell'aria interna (m/s)	0.45	0.0	0.01	0.02
Concentrazione di CO ₂ (ppm)	3000	443	1170	474.6

Figure 2. Descriptive statistics of recorded parameters.

A first examination was focused on openings frequency. The lesson time was divided into time intervals of 10 minutes. Figure 3 highlights that the openings frequency is higher in the first half of the morning, and in particular during the mid-morning break (10:50 – 11:10), at students' arrival (8:00 – 8:10) and between the end of one lesson and the beginning of the following one. Breaks are the preferred moments to intervene [26] because students can act freely, without interrupting teachers' explanations and compromise their own attention. Moreover, when students' concentration is focused on lessons they are less sensitive to environmental stimuli. As reported in previous studies related to offices [24] and residential buildings [20], daily routine influences users' actions and frequency also in the school environment.

adattive degli studenti e di correlarle ai parametri ambientali. Tali azioni sono state accuratamente analizzate per identificare se gli utenti sono influenzati dalla routine giornaliera e per capire quali sono i parametri ambientali che maggiormente stimolano le loro azioni.

4. RISULTATI

Nella sezione seguente vengono riportati i principali risultati. Nella prima parte si espongono una breve statistica dei parametri ambientali monitorati e un'analisi dei comportamenti di apertura e chiusura delle finestre. A seguire, si presentano i risultati delle analisi in regressione lineare e logistica.

La Figura 2 riportata i parametri monitorati, il loro intervallo di variazione, il valore medio e la

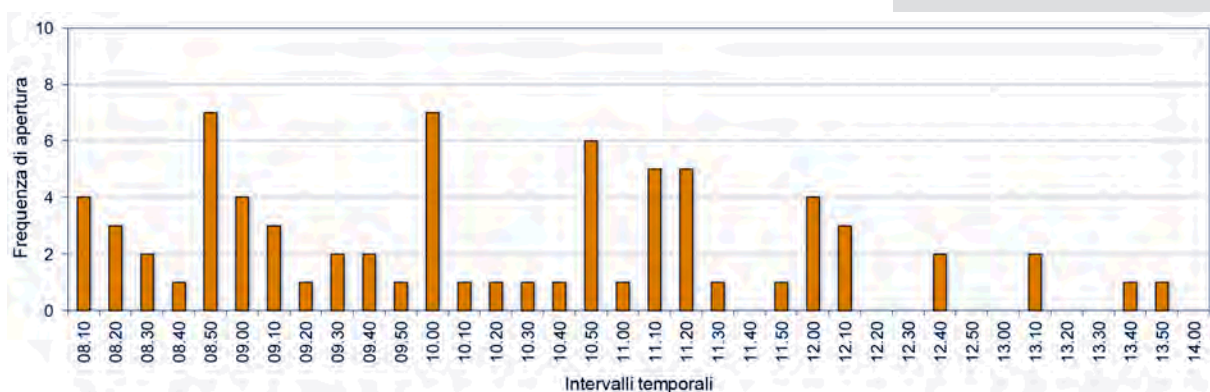


Figure 3. Window opening absolute frequency during the teaching period.

Opening and closing patterns were also studied in relation to the recorded environmental parameters. According to results from previous studies, the opening actions were analysed in relation to indoor temperature and CO₂ concentration, given the high occupant density, while closings were related

deviazione standard. Una prima analisi si è concentrata sulla frequenza delle aperture. L'orario di lezione è stato suddiviso in intervalli temporali di 10 minuti. La Figura 3 evidenzia che la frequenza delle aperture è maggiore durante la prima metà della mattinata e in particolare durante l'intervallo (10:50 – 11:10), all'ingresso degli

to indoor and outdoor temperature. Figure 4 (a and b) shows the opening absolute frequency in relation to indoor temperature and CO₂ concentration. No opening was recorded for indoor temperature lower than 19 °C and for CO₂ concentrations lower than 498 ppm. The highest frequency of openings was recorded for indoor temperature between 21 and 22.5 °C and for CO₂ concentrations between 1000 and 2000 ppm. About 37% of opening occurred for indoor temperature lower than 21 °C, 57.5% in the range from 21 to 22.5 °C and only 5% for temperature higher than 22.5 °C. In relation to CO₂ concentrations, about 33% of openings took place for values lower than 1000 ppm, the 59% in the interval 1000 – 2000 ppm and only the 8% when the CO₂ overcomes 2000 ppm.

Closings absolute frequencies, related to indoor and outdoor temperature, are reported in Figure 4 (c and d). Closing events related to the end of morning lessons were excluded from the statistic because they are not environmentally triggered. Consequently, the analysis concerns only actions in intermediate periods. The results highlight that closing events are concentrated in the interval between 20 and 22 °C for indoor temperature and their occurrence was higher when outdoor temperature was lower than 17.5 °C. The highest percentage (54%) of the window closings was reached for indoor temperature lower than 21 °C, 42% in the range 21 – 22.5 °C and only 4% for temperature higher than 22.5 °C. Regarding the relationship between closing actions and outdoor temperature, 42% of closing occurred when the temperature was lower than 14.5 °C, 34% in the range 14.5 – 19 °C and a percentage of 24% for values higher than 19 °C. This trend highlights that the lower was the outdoor temperature the higher was the probability of a closing event.

The environmental variables have been analysed to develop behavioural models to predict window opening and closing. In order to perform a linear regression analysis with a larger sample, the evaluation included not only the single “opening event” but also the probability to find at least one window open. In the same way, the “window closing” translates into the probability to find all windows closed. Figure 5 shows the obtained linear regression models (dotted lines) on data (dot points), while Figure 6 (left side) reports the coefficients of the equations and the R² for each correlation. The best correlations are for the relationship with indoor temperature and both window open and close probability (R²=0.976 and R²=0.976), while the lowest is the one relating window opening to CO₂ concentration (R²=0.268).

Logistic regressions were performed using the same environmental variables for the linear ones. Figure 5 shows the regression curves (solid lines) on data (dot points). Figure 6 (right side) reports outcomes from logistic regressions

studenti (8:00 – 8:10) e tra la fine di una lezione e l'inizio della successiva. L'interazione con le finestre avviene principalmente durante le pause [26] perché gli studenti possono agire liberamente, senza interrompere le spiegazioni e compromettere la loro attenzione. Inoltre, quando gli alunni sono concentrati sulle lezioni, sono meno sensibili agli stimoli ambientali. Come evidenziato negli studi inerenti agli uffici [24] e alle residenze [20], anche negli ambienti scolastici la routine giornaliera influisce sulle azioni degli utenti e sulla loro frequenza.

Aperture e chiusure sono state studiate anche in relazione ai parametri ambientali registrati. Seguendo i risultati esposti negli studi precedenti, le azioni di apertura sono state correlate alla temperatura interna e alla concentrazione di CO₂, vista l'elevata densità di persone nell'ambiente, mentre le chiusure alla temperatura interna ed esterna. La Figura 4 (a e b) riporta la frequenza assoluta delle aperture in relazione alla temperatura interna e alla concentrazione di CO₂. Non è stata registrata nessuna apertura per valori di temperatura interna inferiori a 19 °C e per CO₂ minori di 498 ppm. La frequenza maggiore di apertura si è verificata per temperature tra 21 e 22.5 °C e per valori di CO₂ compresi tra 1000 e 2000 ppm. Il 37% circa di delle aperture è avvenuto per temperature interne minori di 21 °C, il 57.7% è relativo all'intervallo tra 21 e 22.5 °C e solo il 5% è avvenuto per temperature maggiori di 22.5 °C. Riguardo alla concentrazione di CO₂, circa il 33% delle aperture si è verificato per valori minori di 1000 ppm, il 59% nell'intervallo 1000 – 2000 ppm e solo l'8% quando la CO₂ ha superato le 2000 ppm.

Le frequenze assolute di chiusura, relative alla temperatura interna ed esterna, sono riportate nella Figura 4 (c e d). L'analisi delle azioni di chiusura ha interessato solo quelle relative ai periodi intermedi. Infatti, le azioni compiute al termine delle lezioni sono state escluse dall'analisi statistica, poiché non sono causate da parametri ambientali. I risultati hanno evidenziato che gli eventi di chiusura si sono concentrati nell'intervallo tra 20 e 22 °C per la temperatura interna e il loro accadimento cresce quando la temperatura esterna è inferiore a 17.5 °C. La percentuale di chiusure più elevata (54%) è stata raggiunta per temperature interne minori di 21 °C, il 42% è relativo all'intervallo 21 – 22.5 °C e solo il 4% per temperature maggiori di 22.5 °C. Le correlazioni con la temperatura esterna evidenziano che il 42% delle chiusure è avvenuto quando la temperatura era minore di 14.5 °C, il 34% tra 14.5 – 19 °C e il 24% per valori maggiori di 19 °C. Questo trend mostra che al decrescere della temperatura esterna aumenta la probabilità che avvenga un'azione di chiusura.

Le variabili ambientali sono state quindi analizzate al fine di ottenere i modelli comportamentali di apertura e chiusura delle finestre. Al fine di eseguire un'analisi in regressione lineare con un campione più ampio, la valutazione ha incluso non solo il singolo evento di apertura ma anche la probabilità che ci fosse almeno una finestra aperta. Lo stesso

regression parameters and goodness-of-fit estimators (values for area under ROC curve (AUC), McFadden's R2 and Neglekerke's R2). Regression parameters are all significant, except for CO₂ concentration ($p>0.001$) as for linear regression.

ragionamento è stato fatto per la probabilità di chiusura. La Figura 5 mostra i modelli in regressione lineare ottenuti (linee tratteggiate) in relazione ai dati sperimentali (poli sperimentali), mentre in Figura 6 (lato sinistro) si riportano i coefficienti delle equazioni e l'R2 di ogni correlazione.

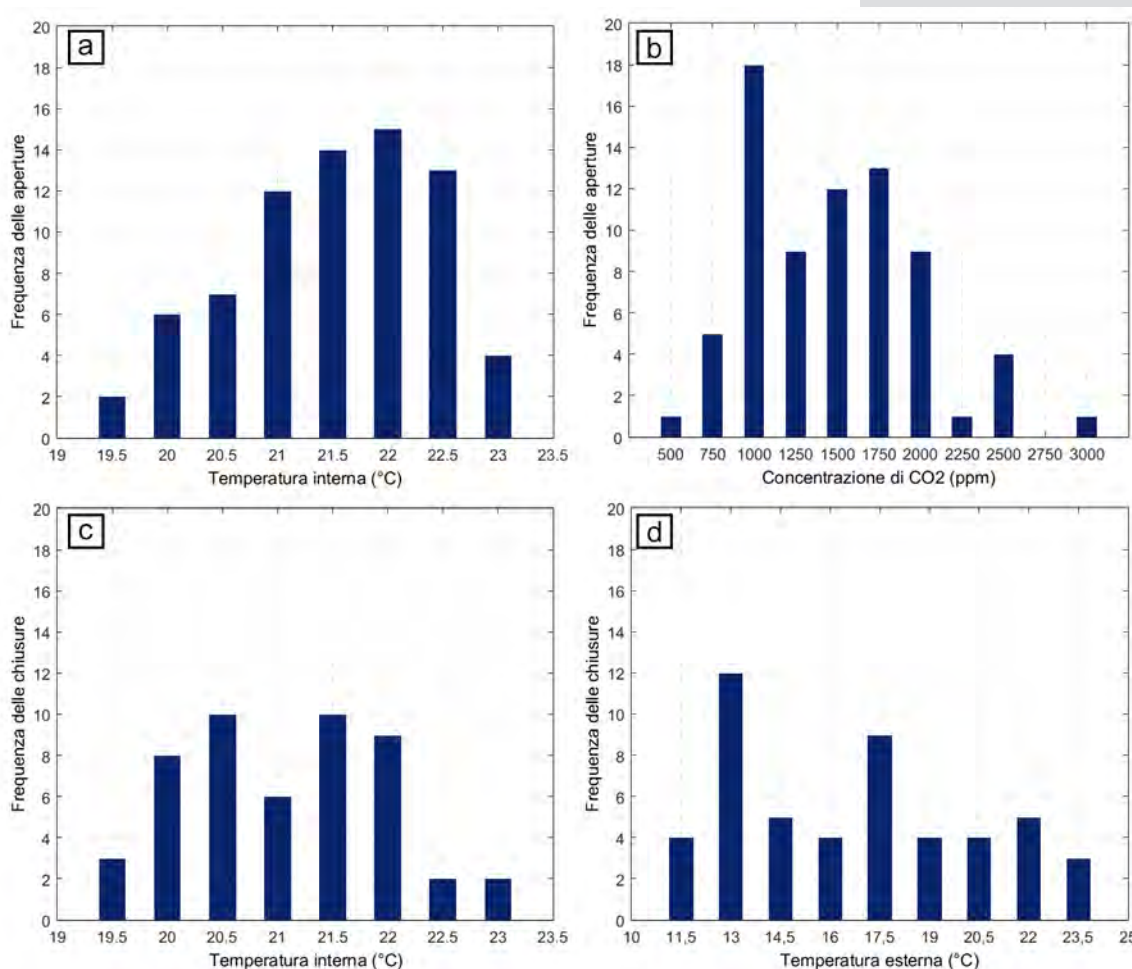


Figure 4. Openings (a and b) and closings (c and d) absolute frequency in relation to environmental variables.

Predictions of window opening and closing probability as a function of indoor temperature are significant, in fact, the AUC (0.719) and the generalised R2 (0.112 and 0.192) are of better statistical quality. Logistic regressions with indoor temperature produce the same coefficients with the opposite sign because data for the “opening” group are the complementary of the “closing” one. The relation between closings and the outdoor temperature is statistically less significant, because of its lower values both for AUC (0.582) and for R2 (0.017 and 0.031).

A monotonically increasing function relates the probability to find a window open and the indoor temperature, while a decreasing function links windows closing and both indoor and outdoor temperature. Results for the correlation between openings and CO₂ are not satisfying, confirming previous findings

Le correlazioni più forti sono tra la temperatura interna e le probabilità sia di apertura sia di chiusura ($R^2=0.85$ and $R^2=0.98$), mentre la più debole è quella che lega aperture e concentrazione di CO₂ ($R^2=0.27$).

Le regressioni logistiche sono state eseguite relazionando i medesimi parametri usati per quelle lineari. In Figura 5 sono riportate le curve in regressione (linee continue) in relazione ai dati sperimentali (poli sperimentali). La Figura 6 (lato destro) espone i risultati delle regressioni logistiche: i coefficienti in regressione e gli estimatori della bontà di adattamento (valori dell'area sotto la curva ROC (AUC), l'R2 di McFadden e l'R2 di Neglekerke). I parametri delle regressioni sono tutti significativi, ad eccezione di quello relativo alla concentrazione di CO₂ ($p>0.001$), come ottenuto anche dalla regressione lineare.

Le predizioni di apertura e chiusura delle finestre in funzione

[26]. It means that users are not driven by this stimulus because of their unawareness of indoor CO₂ concentration increasing.

della temperatura interna sono statisticamente significative, infatti, l'AUC (0.719) e gli R² generalizzati (0.112 e 0.192) sono di qualità

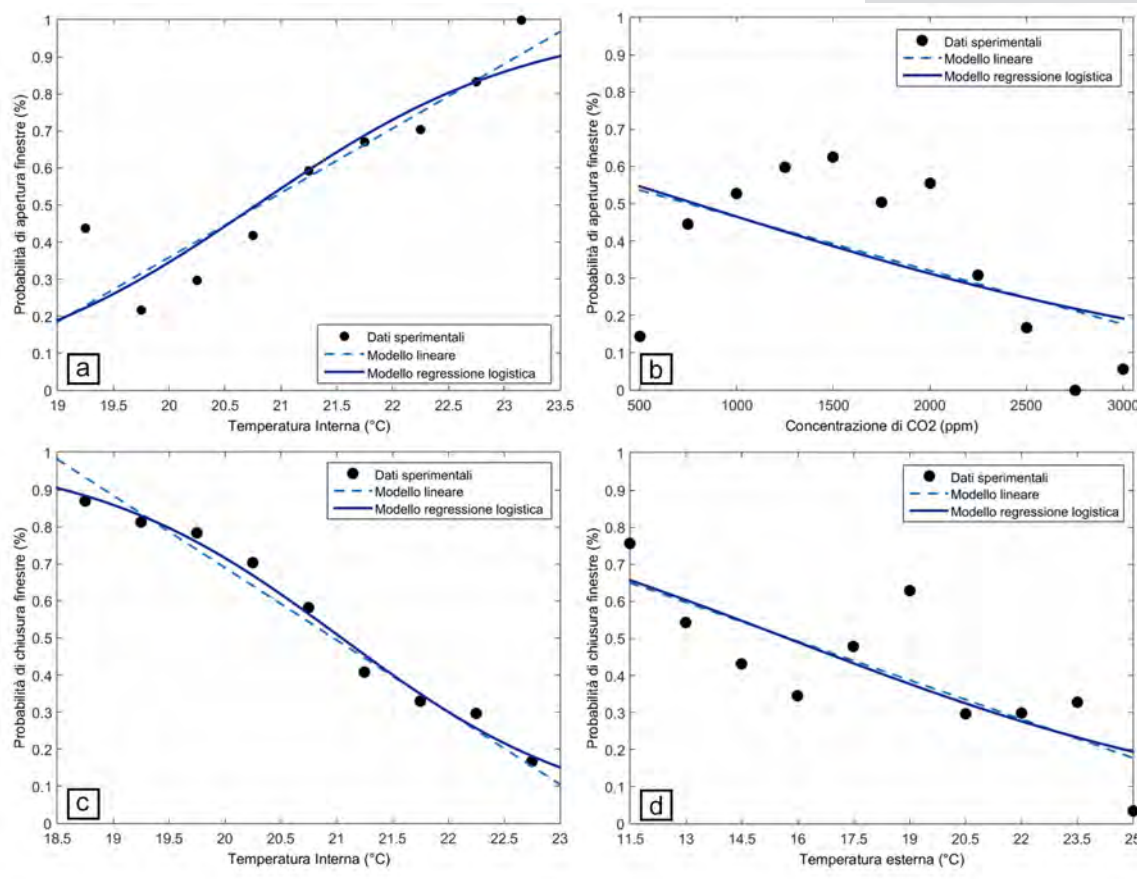


Figure 5. Observational data, linear and logistic regressions.

Correlazioni	Lineare			Logistica					
	β_0	β_1	R ²	β_0	β_1	p-value	AUC	R ² McFadden	R ² Neglekerke
Aperture - T.in.	-3.09	0.17	0.85	-19.43 ± 1.34	0.92 ± 0.069	0.000	0.719	0.112	0.192
Aperture - CO ₂	0.61	-0.0001	0.27	0.56 ± 0.3	-0.0007 ± 0.001	0.001	0.512	0.005	0.010
Chiusure - T.in.	4.59	-0.19	0.98	19.43 ± 1.34	-0.92 ± 0.069	0.000	0.719	0.112	0.192
Chiusure - T.ext.	0.93	-0.03	0.59	1.25 ± 0.51	-0.09 ± 0.03	0.000	0.582	0.017	0.031

Figure 6. Parameters for linear (left side) and logistic (right side) correlations.

In summary, the outcomes from the analyses highlight that the best predictor was the indoor temperature, both for the probability to find at least one window open and for the probability to find all windows closed. However, the outdoor temperature seemed to be a predictor that should not be excluded. Moreover, it was found that the correlation with window opening is quite similar to trends obtained in other studies [15],[19], in relation to the indoor temperature range occurred along the survey (19 – 24 °C). Thus, indoor and outdoor temperatures are variables to be considered in an adaptive behavioural model that had the duty to reproduce the interaction between students and

statistica elevata. Le regressioni logistiche con la temperatura interna producono i medesimi coefficienti ma con segno opposto, perché i dati per il gruppo delle "aperture" sono i complementari di quello delle "chiusure". La relazione tra chiusure e temperatura esterna è di significatività statistica inferiore, con valori minori sia dell'AUC (0.582) che degli R² (0.017 e 0.031). Una funzione monotonicamente crescente descrive la probabilità di trovare una finestra aperta in relazione alla temperatura interna, mentre una funzione decrescente lega le chiusure e sia la temperatura interna sia quella esterna. I risultati della correlazione tra aperture e CO₂ non risultano soddisfacenti, confermando precedenti risultati [26].

windows in classrooms. These results confirm findings from previous studies [15],[17],[26], despite the differences among climates and building uses.

5. CONCLUSIONS

The aim of the present study was the investigation of window use in an Italian school classroom. Environmental parameters and users' adaptive actions were continuously recorded for about one month during spring; from the analysis of the recorded data, linear and logistic correlations were carried out. The findings highlight that indoor temperature is the best predictor both for openings and for closings. Outdoor temperature has a lower influence on occupants' actions but it is statistically significant too. CO₂ concentration is found to have no statistical meaning. Moreover, students are influenced by daily routine, in fact, to restore the thermal comfort and the IAQ they usually act during breaks.

Simulation programs should take into account the real user behaviours, the frequency of their actions and the trigger parameters. In fact, behavioural models, enhancing the simulation results, can aid designers in the design of smart, energy-efficient and comfortable buildings.

Results from this survey move the first steps in this direction; further studies will be needed to test the models on a wider sample and to analyse the influence of other building features, as the exposure and the envelope type.

6. REFERENCES

- [1] Parliament of the European Union, Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of building (recast).
- [2] Andersen Rune Vinther, Toftum Jørn, Andersen Klaus Kaae, Olesen Bjarne W, 2009. *Survey of occupant behaviour and control of indoor environment in Danish dwellings*. Energy and Buildings, 2009, vol. 41, pp. 11–6.
- [3] Leth-Petersen Søren, Togeby Mikael, 2001. *Demand for space heating in apartment blocks: Measuring effects of policy measures aiming at reducing energy consumption*. Energy Economics, 2001, vol. 23, pp. 387–403.
- [4] Wilde Pieter De, 2014. *The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation*. Automation in Construction, 2014, vol. 41, pp. 40–9.
- [5] Majcen D, Itard LCM, Visscher H, 2013. *Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications*. Energy Policy, 2013, vol. 54, pp. 125–36.
- [6] IEA EBC, 2013. Final Report Annex 53 - Occupant behavior and modeling (Separate Document Volume II), 2013.
- [7] Yan Da, O'brien William, Hong Tianzhen, Feng Xiaohang, Gunay H Burak, Tahmasebi Farhang, et al., 2015. *Occupant behavior modeling for building performance simulation: current state and future challenges*. Energy and Buildings, 2015, vol. 107, pp. 264–78.
- [8] Jia Mengda, Srinivasan Ravi S, Raheem Adeeba A, 2017. *From occupancy to occupant behavior: An analytical survey of data acquisition technologies, modeling methodologies and simulation coupling mechanisms for building energy efficiency*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 68, pp. 525–40.
- [9] Barlow Stuart, Fiala Dusan, 2007. *Occupant comfort in UK offices-How adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies*. Energy and Buildings, 2007, vol. 39, pp. 837–46.

Ciò significa che gli utenti non sono spinti da questo stimolo poiché non ne percepiscono l'incremento.

In conclusione, i risultati delle analisi evidenziano che il miglior predittore è la temperatura interna, sia per la probabilità di trovare almeno una finestra aperta sia per la probabilità di trovare tutte le finestre chiuse. Inoltre, sembra corretto non escludere dai predittori anche la temperatura esterna. Va evidenziato che la correlazione tra temperatura interna e apertura delle finestre, segue un andamento simile a quello ottenuto in altri studi [15],[19], relativamente al range di temperature registrate durante il periodo di monitoraggio (19 – 24°C). Quindi, temperatura interna ed esterna sono variabili da includere all'interno di un modello comportamentale atto a predire la reale interazione tra studenti e finestre nelle aule scolastiche. Questi risultati confermano quelli ottenuti in studi precedenti [15],[17],[26], nonostante le differenze tra i climi e le destinazioni d'uso degli edifici.

5. CONCLUSIONI

La presente ricerca ha l'obiettivo di studiare l'interazione tra utenti e finestre in un'aula scolastica italiana. I parametri ambientali e le azioni adattive degli studenti sono stati monitorati in maniera continua per circa un mese durante la stagione primaverile; dall'analisi di questi dati sperimentali sono state ottenute correlazioni in regressione lineare e logistica. I risultati hanno evidenziato che la temperatura interna è il miglior predittore sia per le aperture sia per le chiusure. La temperatura esterna ha un'influenza minore sulle azioni degli utenti ma è anch'essa un parametro statisticamente significativo.

La concentrazione di CO₂ non ha invece alcun significato statistico. Inoltre, gli studenti sono ampiamente influenzati dalla routine quotidiana, infatti, per ristabilire il comfort termico e la qualità dell'aria interna agiscono preferibilmente alle pause piuttosto che durante le lezioni.

I software di simulazione dovrebbero includere in maniera più realistica la componente umana, considerando la frequenza delle azioni compiute e i parametri scatenanti. Infatti, i modelli comportamentali, aumentando la validità dei risultati, possono aiutare i professionisti alla progettazione di edifici smart, energeticamente efficienti e confortevoli.

I risultati di questo studio forniscono un primo passo per raggiungere questo obiettivo; tuttavia saranno necessarie ulteriori ricerche finalizzate al test dei modelli su un campione più ampio e all'analisi dell'influenza di altre caratteristiche dell'edificio, come l'esposizione e il tipo di involucro.

- [10] Giuli Valeria De, Pos Osvaldo Da, Carli Michele De, 2012. *Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools*. Building and Environment, 2012, vol. 56, pp. 335–45.
- [11] Bakó-Biró Zs, Clements-Croome DJ, Kochhar N, Awbi HB, Williams MJ, 2012. *Ventilation rates in schools and pupils' performance*. Building and Environment, 2012, vol. 48, pp. 215–23.
- [12] Rijal HB, Tuohy PG, Nicol JF, Humphreys Ma, Samuel Aaa, Clarke Ja, 2008. *Development of adaptive algorithms for the operation of windows, fans and doors to predict thermal comfort and energy use in Pakistani buildings*. ASHRAE Transactions, 2008, vol. 114, pp. 555–73.
- [13] Li Nan, Li Juncheng, Fan Ruijuan, Jia Hongyuan, 2015. *Probability of occupant operation of windows during transition seasons in office buildings*. Renewable Energy, 2015, vol. 73, pp. 84–91.
- [14] Wei Shen, Buswell Richard, Loveday Dennis, 2013. *Factors affecting "end-of-day" window position in a non-air-conditioned office building*. Energy and Buildings, 2013, vol. 62, pp. 87–96.
- [15] Haldi Frédéric, Robinson Darren, 2009. *Interactions with window openings by office occupants*. Building and Environment, 2009, vol. 44, pp. 2378–95.
- [16] D'Oca Simona, Hong Tianzhen, 2014. *A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices*. Building and Environment, 2014, vol. 82, pp. 726–39.
- [17] Schakib-Ekbatan Karin, Çakıcı Fatma Zehra, Schweiker Marcel, Wagner Andreas, 2015. *Does the occupant behavior match the energy concept of the building? – Analysis of a German naturally ventilated office building*. Building and Environment, 2015, vol. 84, pp. 142–50.
- [18] Jeong Bongchan, Jeong Jae-Weon, Park JS, 2016. *Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings*. Energy and Buildings, 2016, vol. 127, pp. 206–16.
- [19] Schweiker Marcel, Haldi Frédéric, Shukuya Masanori, Robinson Darren, 2012. *Verification of stochastic models of window opening behaviour for residential buildings*. Journal of Building Performance Simulation, 2012, vol. 5, pp. 55–74.
- [20] Cali Davide, Andersen Rune Korsholm, Müller Dirk, Olesen Bjarne, 2016. *Analysis of occupants' behavior related to the use of windows in German households*. Building and Environment, 2016, vol. 103, pp. 54–69.
- [21] Andersen Rune, Fabi Valentina, Toftum Jorn, Corgnati Stefano Paolo, Olesen Bjarne W, 2013. *Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings*. Building and Environment, 2013, vol. 69, pp. 101–13.
- [22] Fabi Valentina, Andersen Rune Vinther, Corgnati Stefano Paolo, 2012. *Window opening behaviour : simulations of occupant behaviour in residential buildings using models based on a field survey*. In: 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world., 2012:12–5.
- [23] Zhang Yufan, Barrett Peter, 2012. *Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building*. Building and Environment, 2012, vol. 50, pp. 125–34.
- [24] Yun Geun Young, Steemers Koen, 2008. *Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer*. Building and Environment, 2008, vol. 43, pp. 1471–82.
- [25] Fritsch R, Kohler a, Nygård-Ferguson M, Scartezzini JL, 1990. *A stochastic model of user behaviour regarding ventilation*. Building and Environment, 1990, vol. 25, pp. 173–81.
- [26] Santamouris Mattheos, Synnefa Afroditi, Assimakopoulos M, Livada Iro, Pavlou Kostantinos, Papaglastra M, et al., 2008. *Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation*. Energy and Buildings, 2008, vol. 40, pp. 1833–43.
- [27] Johnson Ted, Long Tom, 2005. *Determining the frequency of open windows in residences: a pilot study in Durham, North Carolina during varying temperature conditions*. Journal of exposure analysis and environmental epidemiology, 2005, vol. 15, pp. 329–49.
- [28] Inkarojrit Vorapat, Paliaga Gwelen, 2004. *Indoor climatic influences on the operation of windows in a naturally ventilated building*. In: Proceedings of the 21th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Netherlands., 2004:427–31.
- [29] Gunay H Burak, O'Brien William, Beausoleil-Morrison Ian, 2013. *A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices*. Building and Environment, 2013, vol. 70, pp. 31–47.
- [30] ISO, 2001. 7726:2001 Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities., 2001.