

Information modeling for the monitoring of existing buildings' indoor comfort

Antonello Sanna, Angelo Luigi Camillo Ciribini,
Giuseppe Martino Di Giuda, Gianluca Gatto, Valentina Villa,
Emanuela Quaquero, Lavinia Chiara Tagliabue,
Giuseppe Desogus*

Highlights

Building information modelling can provide a valid support to all the phases of retrofit process. The informative model can manage and represent data on indoor hygrothermal comfort. Studying the possibility to use small and smart sensors helping to carry out energy audit is one of the main output of the research.

Abstract

BEMS (Building Energy Management System) and BACS (Building Automation and Control System) make available a high quantity of data on consumptions, indoor and outdoor conditions and users' profiles of a building that can drive the choice of energy retrofit interventions. Moreover, the current developments in the digitalization of the building process, are leading the diffusion of BIM methods and tools which can provide a valid support to manage all data and information for the retrofit process. The paper is focused on the efficient integration of these systems.

Keywords

Building's indoor comfort monitoring, Energy Audit, BIM, Integrated multi sensors

1. INTRODUCTION

The adoption of Building Information Modeling (BIM) methodology on renovation and retrofitting projects is still at a basic level [1]. Despite the urgent need to improve the quality and the functionality of the existing building stock, all the processes related to its transformation are still carried out with traditional analogical methods and instruments. The main cause is that an efficient application of BIM methodology needs overcoming a number of critical issues, such as the identification of necessary information for retrofitting, the collection and proper interpretation of monitored data, the handling of uncertainty and the long time and high resources required for creation of the model of an existing building [2]. In these cases the informative



Antonello Sanna

Dip. di Ingegneria Civile, Ambiente e Architettura, Univ. di Cagliari, via Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

Angelo L. C. Ciribini

Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica, Università di Brescia, via Branze 42, Brescia, 25123, Italia

Giuseppe M. Di Giuda

Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, via G. Ponzio 31, Milano, 20133, Italia

Gianluca Gatto

Dip. di Ingegneria Elettrica ed Elettronica, Univ. di Cagliari, via Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

Valentina Villa

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, corso Duca degli Abruzzi 24, Torino, 10129, Italia

Emanuela Quaquero

Dip. di Ingegneria Civile, Ambiente e Architettura, Univ. di Cagliari, via Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

Lavinia C. Tagliabue

Dip. di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica, Univ. di Brescia, via Branze 42, Brescia, 25123, Italia

Giuseppe Desogus

Dip. di Ingegneria Civile, Ambiente e Architettura, Univ. di Cagliari, via Marengo 2, Cagliari, 09123, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-070-6755395;
fax: +39-070-6755818;
e-mail: gdesogus@unica.it

model has to be generated from the actual 'as-built' state with practically none or only scarce documentation and information [3]. Among all the possible sets of information that can be gathered when analyzing an existing building, one of the most complex and detailed regards its energy performance and consumptions (Energy Audit or Energy Diagnosis). It requires first of all the collection of climatic data regarding the building site. They can be affected by the built and natural context surrounding the building, so at least the geometry of the obstructions nearby must be modelled. Then data on the building opaque and transparent envelope must necessarily be collected, together with other derivative thermal quantities such as steady-state and periodic thermal transmittance. Regarding electrical and thermal systems, their main features and consequent energy performance must be collected and/or assessed. Unlike industry audits, where the output of manufacturing processes is precisely defined, buildings audits require also the assessment of the operating conditions of the building and its use profile [4].

Since the main function of HVAC system is providing suitable hygro-thermal indoor conditions and air quality, it is evident that a comprehensive approach to audits cannot avoid their correct assessment [5]. The thermal comfort sensation is basically depending on the heat balance between the human body and the environment, that is a complex phenomenon, so its whole analysis requires the measurement and assessment of different quantities [6] by the use of suitable instruments [7]. The standard procedure for the measurement of the basic variables and the consequent calculation of comfort indexes are carried out with microclimatic monitoring devices that can be bulky and cannot be easily positioned within occupied spaces. For these reasons they do not fit for continuous monitoring of environmental parameters, that is instead a key point for the conversion of the existing buildings into "cognitive" ones [8].

The increasing presence in buildings of BEMS (Building Energy Management System) and BACS (Building Automation and Control System), makes available a very large amount of data on consumptions, internal and external environmental conditions and use profiles that can be of great help in energy audit procedures. It is also possible integrating in buildings components different dedicated sensor able to collect data on indoor thermal conditions. In both case, the measurement uncertainty is much higher than microclimatic monitoring devices.

In 2018 regional research body Sardegna Ricerche financed the cluster project PRELuDE³ (protocol for the processing of buildings energy efficiency's data), whose main task is to link together all the players of the energy retrofit interventions by the use of BIM [9]. In this context, studying the possibility to

1. INTRODUZIONE

L'adozione della metodologia Building Information Modeling (BIM) nell'ambito degli interventi di ristrutturazione e di retrofitting è ancora a un livello embrionale [1]. Nonostante l'urgente necessità di migliorare la qualità e la funzionalità del patrimonio edilizio esistente, tutti i processi correlati alla sua trasformazione vengono ancora effettuati con strumenti e metodi analogici tradizionali. La causa principale consiste nel fatto che un'applicazione efficiente della metodologia BIM si trova ad affrontare una serie di criticità, quali l'identificazione di informazioni necessarie per l'intervento di retrofitting, la raccolta e la corretta interpretazione dei dati monitorati, la gestione dell'incertezza e le elevate risorse necessarie per la creazione del modello dell'edificio esistente [2]. Per gli interventi di riqualificazione degli edifici esistenti il modello informativo deve essere generato dallo stato 'as-built' a partire da una scarsissima, se non nulla, documentazione d'archivio[3].

Tra tutte le possibili informazioni che possono essere raccolte durante l'analisi di un edificio esistente, quelle che riguardano il comportamento energetico ed i consumi (Audit energetico o Diagnosi energetica) sono fra le più complesse e dettagliate. La prima fase di tale procedura richiede la raccolta di dati climatici per quanto riguarda il luogo di costruzione. Questi possono essere influenzati dal contesto costruito e naturale che circonda l'edificio, per questo motivo deve essere modellata almeno la geometria delle ostruzioni nelle vicinanze. Successivamente devono essere necessariamente raccolti i dati sull'involucro opaco e trasparente, insieme ad altre grandezze derivate come la trasmittanza termica stazionaria e periodica. In merito ad impianti elettrici e termici, devono essere raccolte e/o valutate le informazioni relative alle loro caratteristiche principali e le conseguenti prestazioni energetiche. A differenza degli audit industriali, dove è definito esattamente l'output dei processi produttivi, quelli edili richiedono anche la valutazione delle condizioni operative dell'edificio e del suo profilo di uso [4]. Poiché la funzione principale del sistema HVAC è quella di fornire condizioni indoor igrotermiche e qualità dell'aria idonee, è evidente che un approccio globale alle verifiche non può prescindere dalla loro corretta valutazione [5].

La sensazione di comfort è fondamentalmente dipendente dall'equilibrio termico tra corpo umano e ambiente; si tratta di un fenomeno complesso la cui analisi richiede la misurazione e la valutazione di quantità differenti [6] tramite l'uso di idonei strumenti [7]. La procedura standard per la misurazione delle variabili di base e il conseguente calcolo di indici di comfort è condotta con dispositivi di monitoraggio microclimatici che

use small and smart sensors helping to carry out energy audit is one of the main activities. The research, lead by the DICAAR Department of the University of Cagliari together with DIEE Department and Sotacarbo SpA, with the collaboration of Polytechnic University of Milan, is currently focused on the monitoring of the case study building: the Mandolesi Pavilion of the Faculty of Engineering and Architecture in Cagliari. In the frame of this research, the present paper is aimed at investigating how complex comfort indexes can be derived from small sensors measurement and how they can be collected, managed and represented by the use of BIM.

2. STATE OF THE ART

Currently, the main theories regarding thermal comfort in indoor inhabited spaces are two: the first originates from the studies of Fanger [10], while the second is due to the studies on adaptive models [11, 12]. It is generally accepted that the use either of the former or the latter depends on different boundary conditions [13]. The Fanger's method has been preferred in this study due to its higher complexity requiring a wider set of information.

According to the standard procedures [6], thermal comfort can be defined by one global and few local indexes. In the following only the first will be taken into account. The statistic response of a given number of occupants to a thermal environment can be expressed by the use of PMV (Predicted Mean Vote) or the correlated PD (Percentage of Dissatisfied). Their calculation requires six input quantities. Two depend on occupants: clothing insulation (CLO) and metabolic rate (MET). Four are related to environment: air temperature (t_a), relative humidity (RH), air velocity (v_a), mean radiant temperature (MRT). The acceptability of different set of environmental and personal variables can be verified calculating PMV and confronting the results with the threshold values given by standards. They are not fixed, but depend on the intended use of the spaces (residential, educational, hospital ...): from $\pm 0,2$ (space's category A) to $\pm 0,7$ (category C) [6].

The measurement of the four environmental quantities has to be carried out with certified sensors (at least a psychrometer, a globe thermometer and an anemometer) that are described in detail in [7].

As already explained, this kind of devices unlikely suits for continuous environmental monitoring. The sensors tested in the present research are characterized by smaller dimensions, possibility to be easily integrated in building components and able to connect to existing Wi-Fi networks.

In the case study of PRELUDE³ project a set of similar sensors has been installed (Figure 3).

possono essere ingombranti, il cui posizionamento all'interno di spazi occupati non è attività semplice. Per questi motivi essi non si adattano al monitoraggio continuo dei parametri ambientali, che invece è un elemento chiave per la conversione degli edifici esistenti in "edifici cognitivi" [8].

La crescente presenza negli edifici di sistemi BEMS (Building Energy Management System) e BACS (Building Automation and Control System), mette a disposizione una grande quantità di dati su consumi, condizioni ambientali interne ed esterne e profili d'uso che possono essere di grande aiuto nelle procedure di audit energetico. È anche possibile l'integrazione nei diversi componenti dell'edificio di sensori in grado di raccogliere dati sulle condizioni termiche interne. In entrambi i casi, l'incertezza di misura è molto superiore a dispositivi di monitoraggio microclimatici.

Nel 2018, l'ente di ricerca regionale Sardegna Ricerche ha finanziato il progetto cluster PRELUDE³ (Protocollo per l'Elaborazione dei Dati di Efficienza Energetica degli Edifici), il cui scopo è quello di promuovere un'efficace interazione nell'ambito di interventi di retrofit energetici tra i soggetti coinvolti mediante l'uso della metodologia BIM [9]. In questo contesto, lo studio sull'impiego di sensori piccoli e intelligenti, è una delle principali attività che contribuisce a svolgere efficacemente l'attività di audit energetico.

La ricerca, condotta dai dipartimenti DICAAR e DIEE dell'Università di Cagliari, dalla Sotacarbo SpA, con la collaborazione del Politecnico di Milano, è attualmente focalizzata sul monitoraggio di un edificio caso di studio: il Padiglione Mandolesi della facoltà di Ingegneria e Architettura sito a Cagliari. Nell'ambito di questa ricerca, il presente contributo mira ad indagare la complessità del set degli indici di comfort che possono derivare dalle misure di piccoli sensori e come tali set possono essere raccolti, gestiti e rappresentati mediante l'impiego del BIM.

2. STATO DELL'ARTE

Attualmente, le principali teorie sul comfort termico negli spazi indoor sono due: la prima nasce dagli studi di Fanger [10], mentre la seconda è legata agli studi sui modelli adattivi [11, 12]. È generalmente accettato che l'uso della prima o della seconda dipende da diverse condizioni al contorno [13]. Il metodo di Fanger è stato preferito in questo studio, dato che esso richiede la gestione di un insieme più ampio di informazioni.

Secondo le procedure standard [6], il comfort termico può essere definito da un indice globale e da alcuni locali. Di seguito sarà preso in considerazione solo il primo. La risposta statistica di un dato numero di occupanti ad un ambiente termico può essere espressa mediante l'uso del PMV (Predicted Mean Vote) o del PD correlato (Percentage

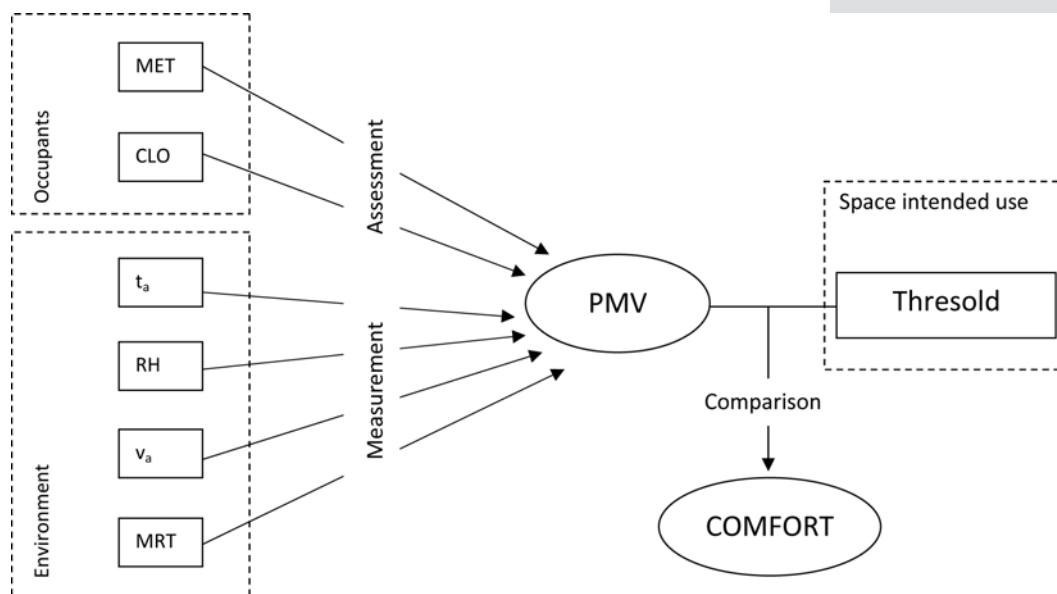


Figure 1. Procedure for the evaluation of indoor global thermal comfort according to Fanger's theory and standard ISO 7730 [6].



Figure 2. Full microclimatic station for the measurement of environmental parameters affecting occupants' global comfort sensation, according to ISO 7726 [7].



Figure 3. Multi sensor room controller installed in Mandolesi Pavilion by PRELuDe³ project.

On the one hand, it is evident that the quality of measurement of the integrated multi sensor is not as high as the one of a certified microclimatic station. On the other hand they can provide continuous measurement that can be easily transferred to a dedicated common data environment by Wi-Fi connections. For the reasons it is authors' opinion that it is worthy to investigate on a simplified methodology to obtain comfort indexes by small sensors measurement and to represent them by the use of BIM.

3. METHODOLOGY

The case study, the Mandolesi Pavilion, is a contemporary building, nowadays historicized, of particular architectural and iconic value. Designed starting from 1962 by Enrico Mandoles, was completed in 1970 [14]. Inside the building, two offices have been the object of sensorization aimed at detecting parameters useful for defining performance and comfort within the building spaces.

After a reconnaissance work on the available documentation about the building, on the geometric, technical and technological aspects of its components, the work continued with the definition of a conceptual scheme of decomposition of the building into constructive objects categories (PBS). Then, with the choice of alphanumeric contents to be capitalized for each of them, the level of detail of the model can be defined. Finally, a set of parameters to "inform" the model components was selected. The building components were modeled respecting the architectural detail and the current internal distribution scheme. Furthermore, we proceeded to associate a parametric object in the digital model of the building to each sensor located in the two rooms indicated above. Through the use of the BimOne plug-in, which allows the connection of the digital model database to a spreadsheet, the data coming from the sensors

of Dissatisfied). Il loro calcolo richiede sei grandezze di input. Due dipendono dagli occupanti: isolamento dell'abbigliamento (CLO) e tasso metabolico (MET). Quattro sono legate all'ambiente: temperatura dell'aria (t_a), umidità relativa (RH), velocità dell'aria (v_a), temperatura radiante media (MRT). L'accettabilità di differenti set di variabili può essere verificata calcolando il PMV e confrontando i risultati con i valori di soglia dati dalle norme.

Questi non sono fissi, ma dipendono dalla destinazione d'uso degli spazi (residenziale, educativo, ospedaliero ...): da $\pm 0,2$ (categoria A dell'ambiente) a $\pm 0,7$ (categoria C) [6].

La misurazione delle quattro grandezze ambientali deve essere effettuata con sensori standard certificati (almeno uno psicrometro, un termometro a globo ed un anemometro) descritti dettagliatamente in [7].

Come già anticipato, questo tipo di dispositivi difficilmente si adatta ad un monitoraggio ambientale continuo.

I sensori testati dalla presente ricerca sono di ridotte dimensioni, possono essere facilmente integrati nei componenti dell'edificio e risultano in grado di connettersi alle reti Wi-Fi esistenti.

Nel caso di studio del progetto PRELuDE³ è stata installata una serie di sensori simili (figura 3).

È evidente che la qualità della misurazione del multi sensore integrato non è elevata come quella di una stazione microclimatica certificata.

D'altra parte tali sensori forniscono misurazioni continue che possono essere facilmente trasferite in un ambiente di condivisione dati dedicato tramite connessioni Wi-Fi. Per le ragioni sopra esposte, è opinione degli autori che sia opportuno investigare su una metodologia semplificata per ottenere indici di comfort mediante l'utilizzo di piccoli sensori le cui misurazioni saranno rese disponibili mediante l'uso della modellazione informativa degli edifici.

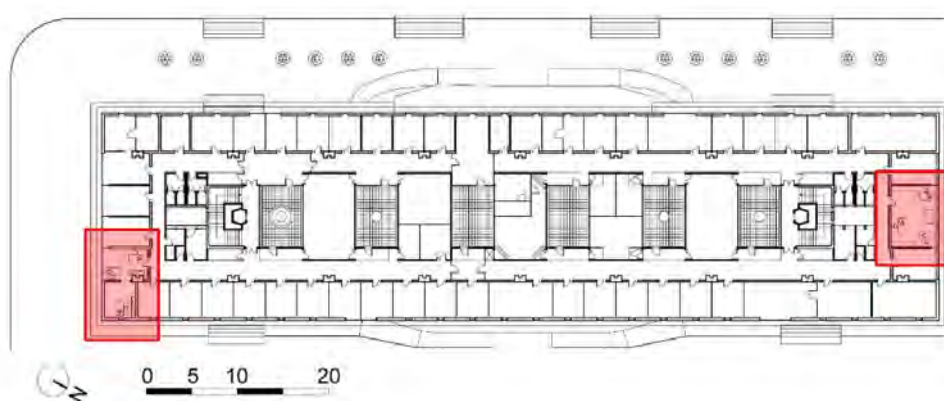


Figure 4. Location of sensorized offices.

and recorded in the spreadsheet can be capitalized and displayed in the room schedules of Revit with a simple updating of the model.

In the following a simplified procedure for the calculation and representation of comfort indexes is proposed. In the next section, the results of its application to the case study will be discussed.

The first step has been the reduction and simplification of the input parameters. The installed sensors are able to measure t_a and RH, but MRT and v_a remain substantially unknown. The first can be measured by a globe thermometer, that, despite its precision [15], can unlikely be incorporated in small smart devices. Many studies are nowadays available on possible alternative measurement and calculation of MRT, since it depends on the surface temperature of indoor walls, ceiling and floor and on their geometry, more precisely on the view factors between the point of measurement and each surrounding surface [16]. Some of them take also into account the use of the informative model of the building [17].

The purposes of the present work suggest an even more simplified method that consider MRT equal to T_a . Such hypothesis, after having fixed the values of

3. METODOLOGIA

Il caso studio è il Padiglione Mandolesi, nel campus della Facoltà di Ingegneria, una importante architettura contemporanea ormai storicizzata, progettata a partire dal 1962 dall'ing. Enrico Mandolesi e conclusa nel 1970 [14]. All'interno dell'edificio sono stati scelti due uffici che sono stati oggetto di sensorizzazione atta a rilevare parametri utili per la definizione delle prestazioni e del comfort all'interno degli spazi dell'edificio. Dopo un'accurata ricognizione in merito alla documentazione disponibile dell'edificio, dei relativi aspetti geometrici, tecnici e tecnologici dei suoi componenti il lavoro è proseguito con la definizione di uno schema concettuale di scomposizione del manufatto in categorie di oggetti costruttivi (PBS), con la scelta dei contenuti alfanumerici da capitalizzare per ciascuno di essi e, di conseguenza, con la definizione del livello di dettaglio del modello. Infine, si è proceduto alla selezione di un set di parametri necessari a "informare" i componenti del modello. Si è proceduto, quindi, alla modellazione dei componenti dell'edificio, rispettando il più possibile il dettaglio architettonico e lo schema

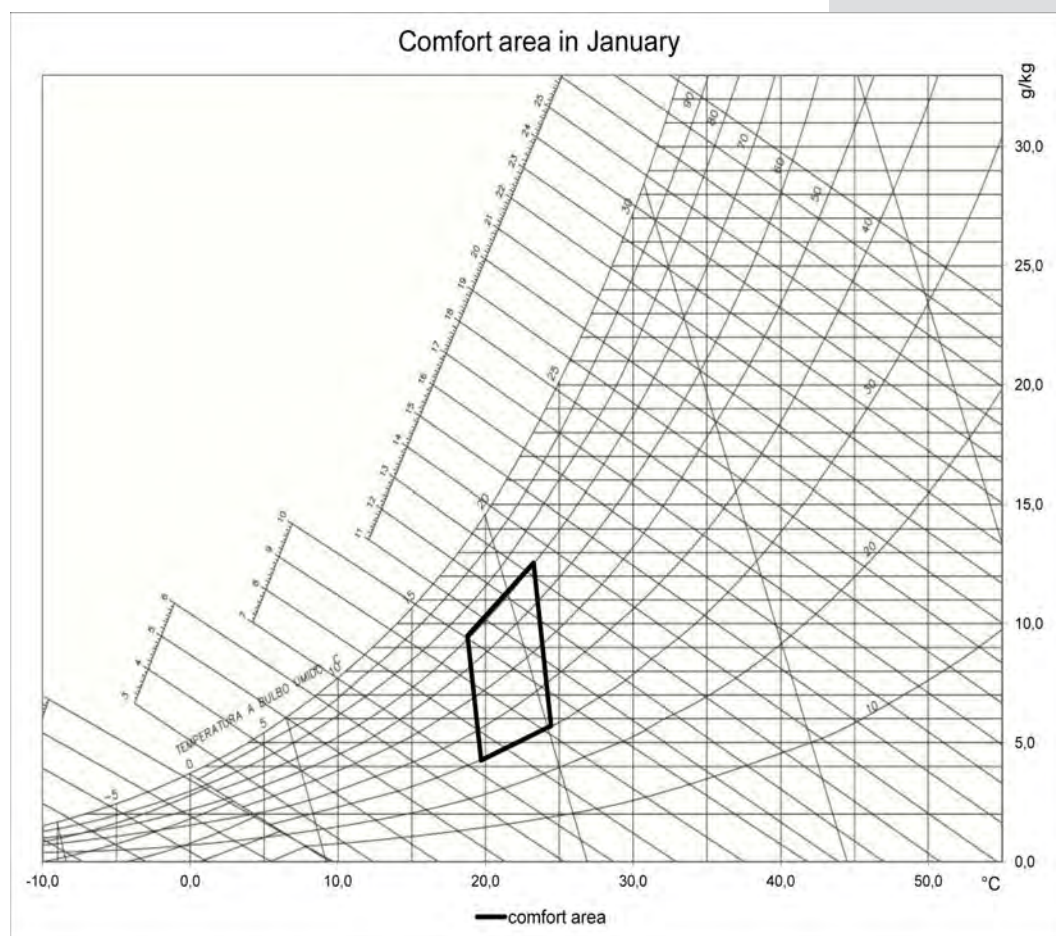


Figure 5. Comfort area drawn for winter conditions in an office space.
 $MET=1,2$; $CLO=1$; $v_a=0,1$ m/s; $MRT=t_a$; $PMV_{cl}=0,5$; $PMV_{ul}=0,5$ (space category B).

CLO, MET and v_a , favors the graphical representation of the results because “iso-PMV” conditions can be depicted on a psychrometric chart [18].

MET can be fixed taking into account the activity carried on within the room. It is information that can be easily correlated to the informative model spaces. CLO and v_a can be set according to the year’s period that can be read by the sensors’ measurements.

Instead of calculating PMV starting from the sensors measurement, an inverse approach has been proposed, in order to better represent the comfort conditions on psychrometric charts. It is a key point of the work, since they can be easily linked to the informative model and give an immediate overview of eventual discomfort occurrences. The workflow proposed is the following.

MET, that depends on activity, thus on the space use, is read from the model room schedule. CLO and v_a are assigned according to the date registered by the sensors. The PMV thresholds (in the following PMV_{ll} and PMV_{ul} for the lower and upper acceptable limits) are read from the room space schedule where they are set according to its category [6]. MRT is set equal to t_a . Under such hypotheses, by the use of a dedicated spreadsheet that reads the required input data from the model and the CDE, the comfort area can be drawn on a psychrometric chart as in figure 5.

The sides of the comfort area are the iso- PMV_{ll} and iso- PMV_{ul} lines, while the top and bottom ones are drawn according to the maximum and minimum acceptable RHs that are 70% and 30% [6]. The area is calculated solving the nonlinear system described in [6] and generally used to calculate PMV

distributivo interno attuale. Inoltre, si è proceduto all’associazione, ad ogni sensore collocato nei due locali indicati sopra, di un oggetto parametrico nel modello digitale dell’edificio. Attraverso l’utilizzo del plug-in BimOne, che consente il collegamento del database del modello digitale ad un foglio di calcolo, i dati provenienti dai sensori e registrati nel foglio di calcolo possono, con un semplice aggiornamento del modello, essere capitalizzati e visualizzati negli abachi dei locali.

Di seguito viene proposta una procedura semplificata per il calcolo e la rappresentazione degli indici di comfort. Nella prossima sezione verranno discussi i risultati della sua applicazione al caso studio.

Il primo passo è stato la riduzione e la semplificazione dei parametri ambientali di input. I sensori installati sono in grado di misurare T_a e RH, ma MRT e v_a rimangono sostanzialmente sconosciute. La prima può essere misurata con globo-termometro, che, nonostante la sua precisione [15], difficilmente può essere incorporato in piccoli dispositivi. Attualmente sono disponibili numerosi studi su possibili misure alternative e sul calcolo della MRT, poiché essa può essere anche calcolata a partire dalla temperatura superficiale delle pareti interne, del soffitto e del pavimento e dalla loro geometria, più precisamente dai fattori di vista tra il punto di misurazione e ogni superficie circostante [16]. Alcuni di essi tengono conto anche dell’uso del modello informativo dell’edificio [17].

Il presente lavoro suggerisce un metodo ancora più semplificato che considera MRT uguale a T_a . Tale ipotesi, dopo aver individuato i

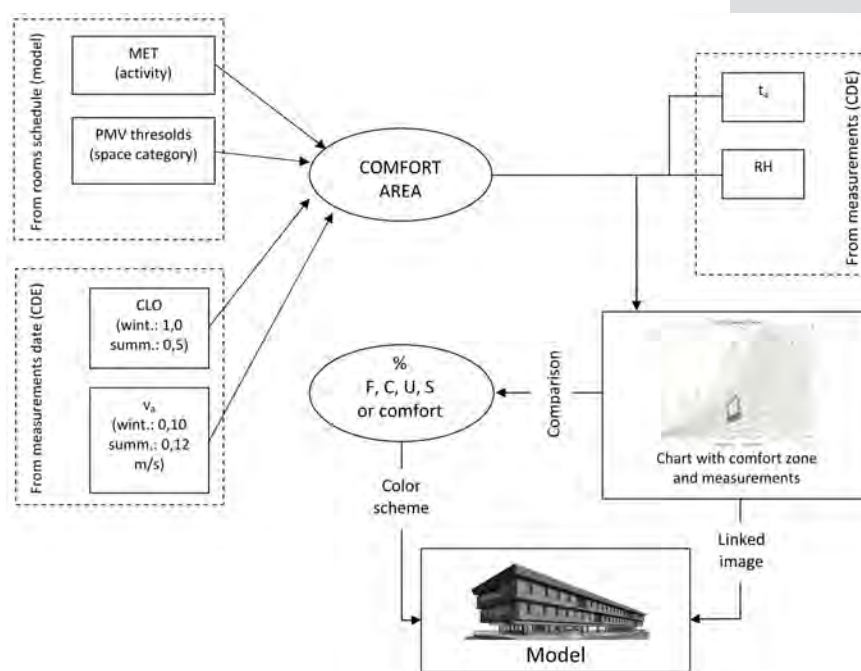


Figure 6. Workflow for the proposed methodology. The assessment of comfort in indoor spaces exploits the model for both input data and output representation.

starting from the standard six input parameters (see previous section).

Once the comfort area is identified, the spreadsheet compares t_a and RH from the sensor to the drawn limits. If the point is on the left of the area, a too cold condition occurs (“F”). If it is on the right, it means too hot inside the room (“C”). If the point is within both sidelines, but above or under the comfort zone a too humid (label “U”) or too dry (label “S”) conditions are respectively assigned to the point. In case of none of these occurrences, the room is in comfort conditions.

The charts with comfort zones and dotted with measurements are linked to the room schedule. The spreadsheet calculates the percentage of F, C, U and S points on a whole monthly set of measurement. These percentages are shown on the model by a color scheme for each room equipped by sensors.

4. RESULTS

Currently in Mandolesi Pavilion, two rooms (north and south facing) are equipped with smart sensors collecting data on environmental conditions (t_a , RH, illuminance, CO_2) and energy consumptions.

Among the data stored in the CDE, two set of environmental measurement

valori di CLO, MET e va , favorisce la rappresentazione grafica dei risultati perché le condizioni di “iso-PMV” possono essere rappresentate su un grafico psicrometrico [18].

Il valore di MET può essere assegnato tenendo conto dell’attività svolta all’interno della stanza. È un’informazione che può essere facilmente correlata ai locali del modello informativo. I valori di CLO e va possono essere impostati in base al periodo dell’anno, il quale può essere rilevato dalle misure dei sensori.

Invece di calcolare il PMV a partire dalla misurazione dei sensori, è stato proposto un approccio inverso, al fine di rappresentare al meglio le condizioni di comfort nei diagrammi psicrometrici. Questo risulta un punto chiave del lavoro, dal momento che tali diagrammi possono essere facilmente collegati al modello informativo e fornire una panoramica immediata degli eventuali disagi. Il flusso di lavoro proposto è il seguente. MET, che dipende dall’attività, quindi dall’uso del locale, viene letto dal programma da un abaco ad esso associato. CLO e va vengono assegnati in base alla data registrata dai sensori. Le soglie PMV (nel seguito PMV_{li} e PMV_{si} per i limiti inferiore e superiore accettabili) vengono lette da abachi dei locali dove sono impostate in base alla relativa categoria [6]. MRT è impostata uguale a t_a . In base a tali ipotesi, mediante l’uso di un

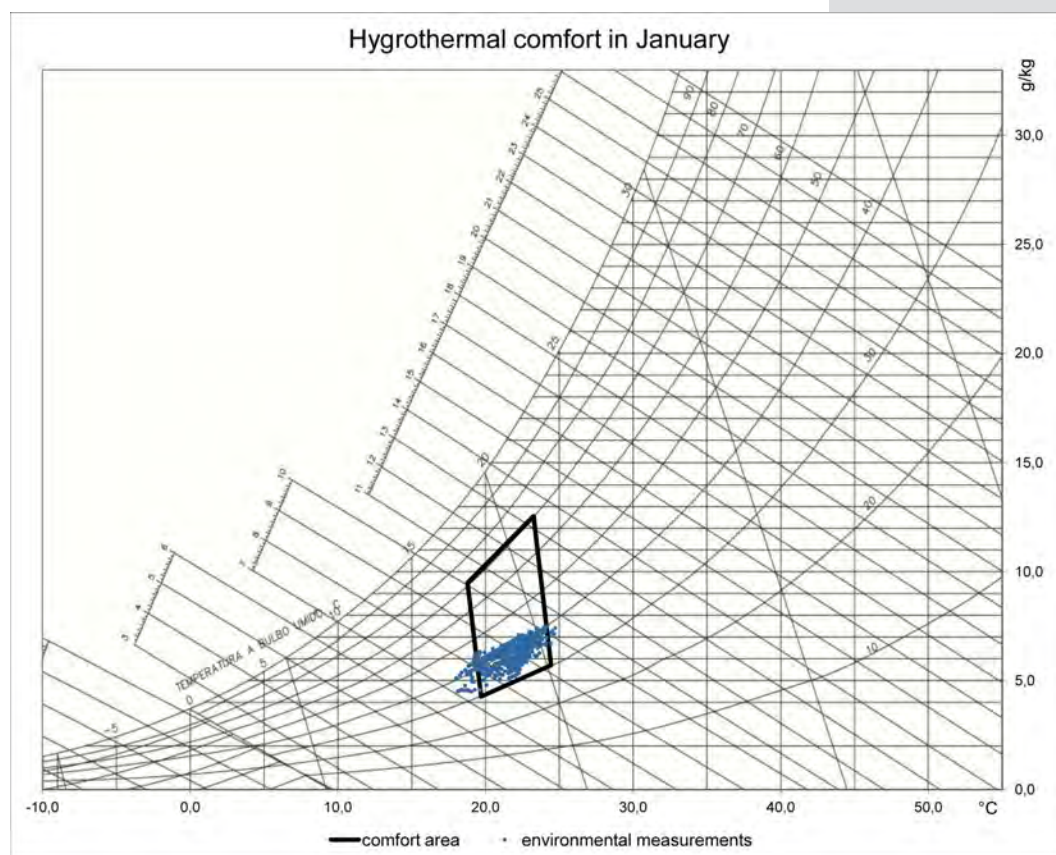


Figure 7. Comfort area in January with t_a and RH measurements.

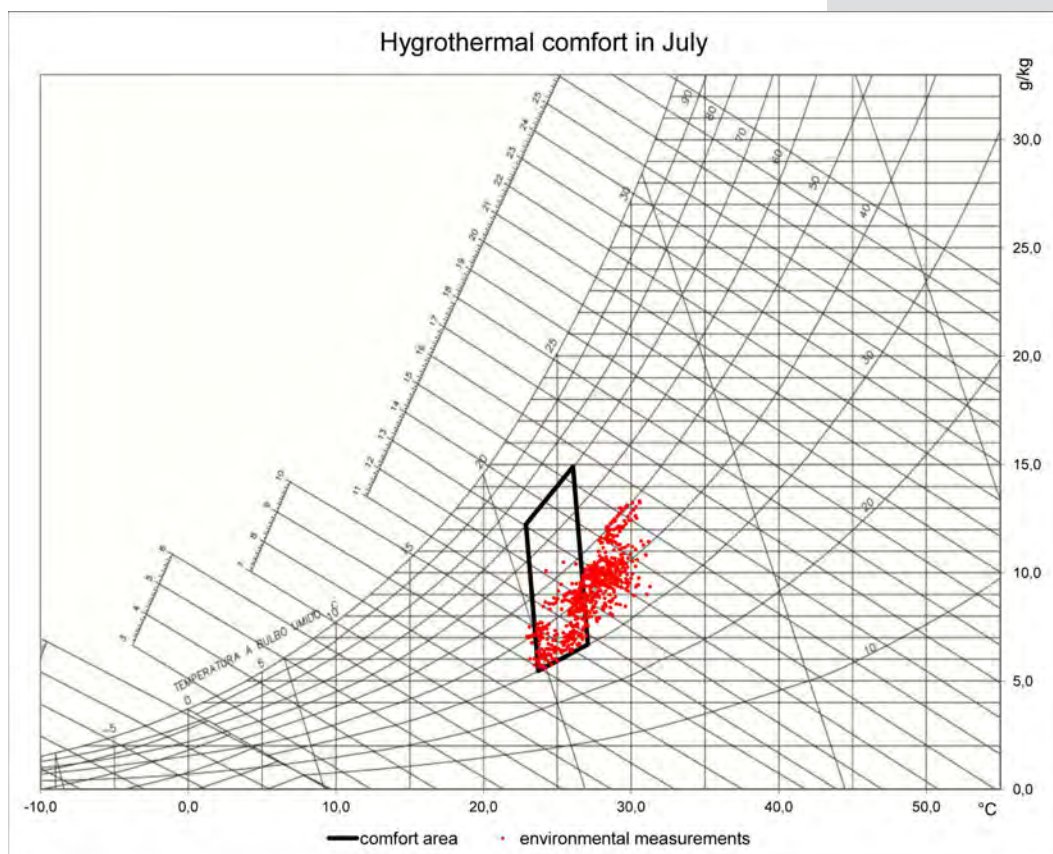


Figure 8. Comfort area in July with t_a and RH measurements.

have been selected for the test of the methodology previously described.

They refer to July 2017 and January 2018 and have been measured in the north facing room.

The sensors have an acquisition rate of 5 minutes. Since the response of human body to environment has not such rapidity, hourly averages of t_a and RH have been calculated and imported in the dedicated spreadsheet. Then MET, PMV_{li} and PMV_{ul} have been read from the model. For an office building MET is equal to 1,2 while PMV limits are $\pm 0,5$. From the date of the hourly measurements averages the spreadsheet has selected the suitably values for v_a (0,1 m/s for January and 0,12 for July) and CLO (1 for January and 0,5 for July, due to different predicted level of clothing).

In January very few points are below the minimum acceptable, while in July, a conspicuous number of points is on the right of the comfort area.

This representation gives an immediate overview of the measured data, however do not consent to associate them to the moment of acquisition. An alternative representation is depicted in figures 9 and 10.

In those cases it is possible to identify the days in which comfort is not provided. The dotted lines represent the temperature corresponding to PMV_{li} and PMV_{ul} for a relative humidity equal to the measured one.

foglio di calcolo dedicato che legge i dati di input richiesti dal modello e dal CDE, l'area di comfort può essere disegnata su un diagramma psicrometrico come in figura 5.

I bordi laterali dell'area di comfort sono le linee iso-PMV_{li} e iso-PMV_{ul}, mentre quelli superiore e inferiore sono disegnati in base alla RH massima e minima accettabili che sono 70% e 30% [6]. L'area viene calcolata risolvendo il sistema non lineare descritto in [6] e generalmente utilizzato per calcolare il PMV a partire dai sei parametri standard di ingresso (si veda la sezione precedente). Una volta identificata l'area di comfort, il foglio di calcolo confronta t_a e RH rilevati dal sensore con i limiti rappresentati. Se il punto si trova a sinistra dell'area, si verifica una condizione troppo fredda ("F"). Se è a destra, significa troppo caldo all'interno della stanza ("C"). Se il punto si trova all'interno di entrambi i bordi laterali, ma sopra o sotto la zona di comfort, al punto vengono assegnate rispettivamente condizioni eccessivamente umide (etichetta "U") o secche (etichetta "S"). In caso di nessuno di questi eventi, l'ambiente è in condizioni di comfort.

I grafici con le zone di comfort e le varie misurazioni sono collegati alla tabella del locale. Il foglio di calcolo elabora la percentuale di punti F, C, U e S sull'intero insieme mensile di misure. Queste percentuali sono indicate sul modello virtuale

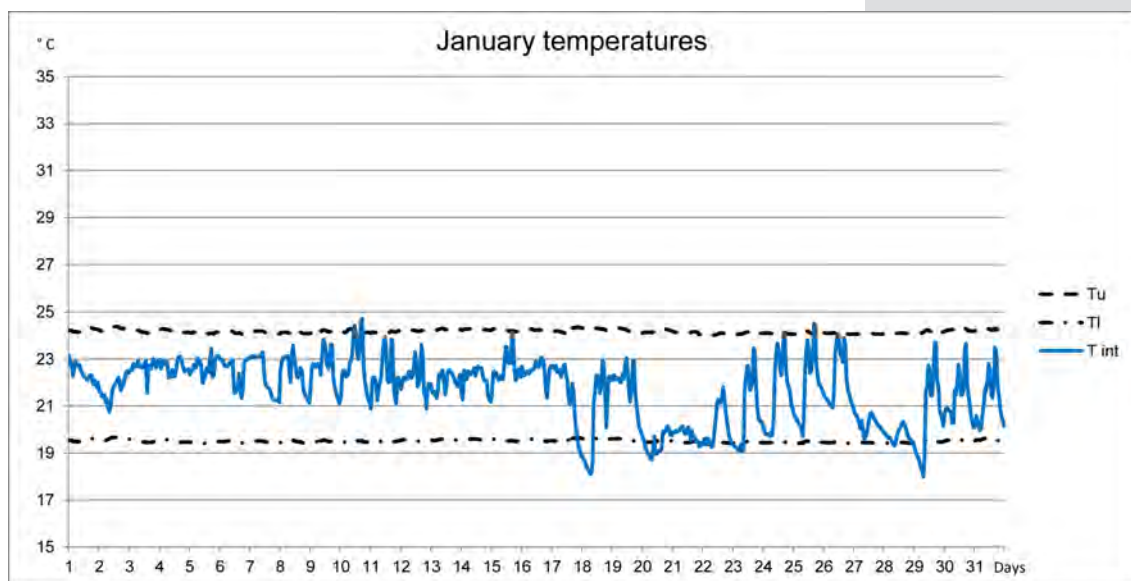


Figure 9. Indoor temperatures measured in January compared with comfort limits. T_u and T_l are the temperatures corresponding to PMVII and PMVul for a relative humidity equal to the measured one.

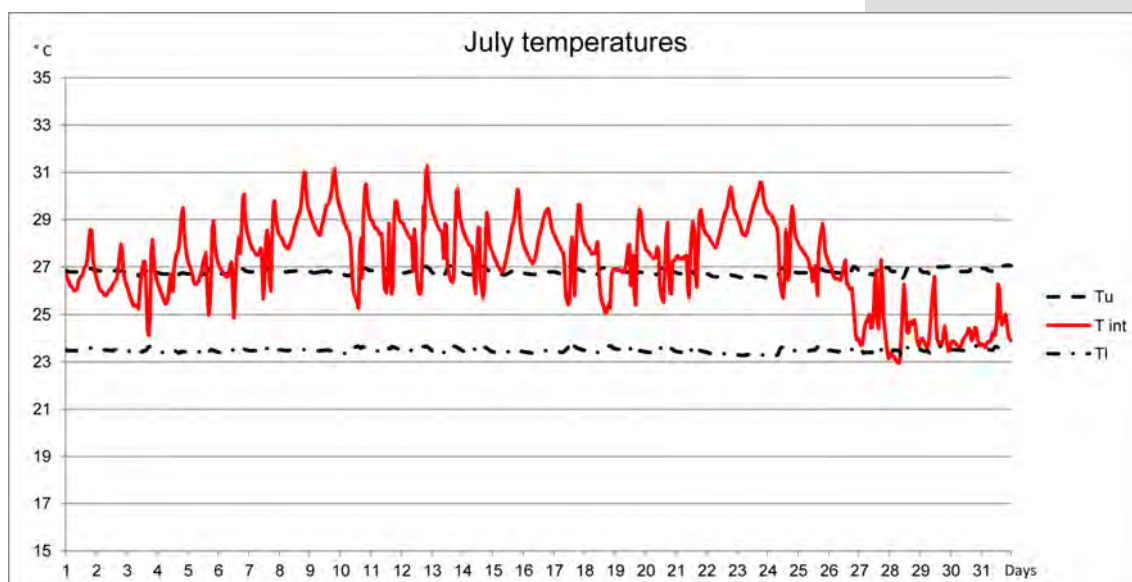


Figure 10. Indoor temperatures measured in July compared with comfort limits. T_u and T_l are the temperature corresponding to PMVII and PMVul for a relative humidity equal to the measured one.

The spreadsheet has counted the number of points inside and outside the comfort areas, identifying also their relative position.

In January only 7,8 % of hours are beyond comfort limits while in July comfort is reached only for the 38,6% of time. Data collected by the sensors and the relative elaborations have been structured inside the informative model. The creation of a room schedule has allowed the capitalization of historical data recorded by the sensors and of diagrams about the comfort level associated with the various rooms of the building.

In figure 11 it is possible to identify the temperatures recorded in the north-

dell'edificio, attraverso uno schema colore, per ogni stanza dotata di sensori. L'intero flusso di lavoro è mostrato in figura 6.

4. RISULTATI

Attualmente nel padiglione Mandolesi, due locali (posizionati a nord e a sud) sono dotati di sensori che raccolgono dati sulle condizioni ambientali (temperatura, umidità relativa, illuminamento, CO_2) e consumi energetici. Tra i dati archiviati nel CDE, sono stati selezionati due set di misure ambientali per il test della metodologia precedentemente descritta. Si riferiscono a luglio 2017 e gennaio 2018 e sono stati

facing room both in July 2017 and in January 2018.

Figure 12 shows that the room schedule contains parameters for the organization of the diagrams that very clearly represent the comfort conditions of the same room with respect to the required limits.

Finally the use, inside the room schedule, of color schemes has allowed to provide an immediate visualization of the situations of discomfort within the sensorized rooms.

misurati nel locale ubicato a nord. I sensori hanno una velocità di acquisizione di 5 minuti. Poiché la risposta del corpo umano alle condizioni dell'ambiente non ha una tale rapidità, sono state calcolate le medie orarie di t_a e RH per poi essere importate nel foglio di calcolo dedicato. Quindi MET, PMV_h e PMV_{al} sono stati letti dal modello. Per un edificio destinato ad uso ufficio MET è uguale a 1,2 mentre i limiti PMV sono $\pm 0,5$. Dalla data delle misure medie orarie il foglio di calcolo ha

| HOURS OF COMFORT OR DISCOMFORT (%) | | |
|------------------------------------|---------|-------|
| month | January | July |
| comfort | 92,2% | 38,6% |
| hot (C) | 0,8% | 59,5% |
| cold (F) | 7,0% | 1,9% |
| humid (H) | 0,0% | 0,0% |
| dry (S) | 0,0% | 0,0% |

Table 1. Percentage of hours within or beyond comfort limits. The table shows also the reason for an eventual overstepping.



Figure 11. Room schedule and historical temperature data.

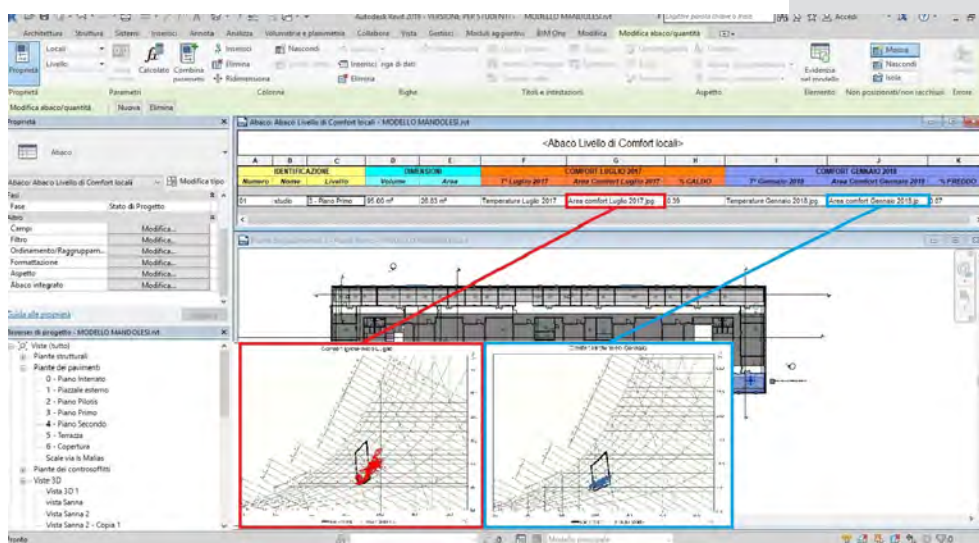


Figure 12. Room schedule and data on internal comfort conditions.

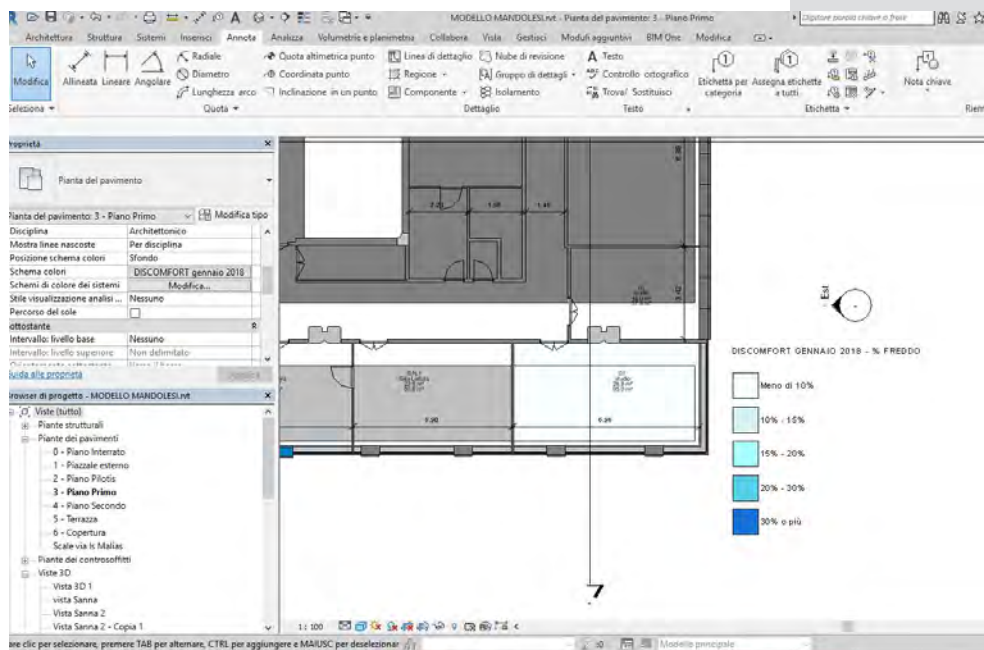


Figure 13. Room schedule and color schemes for reporting discomfort situations in January 2018.

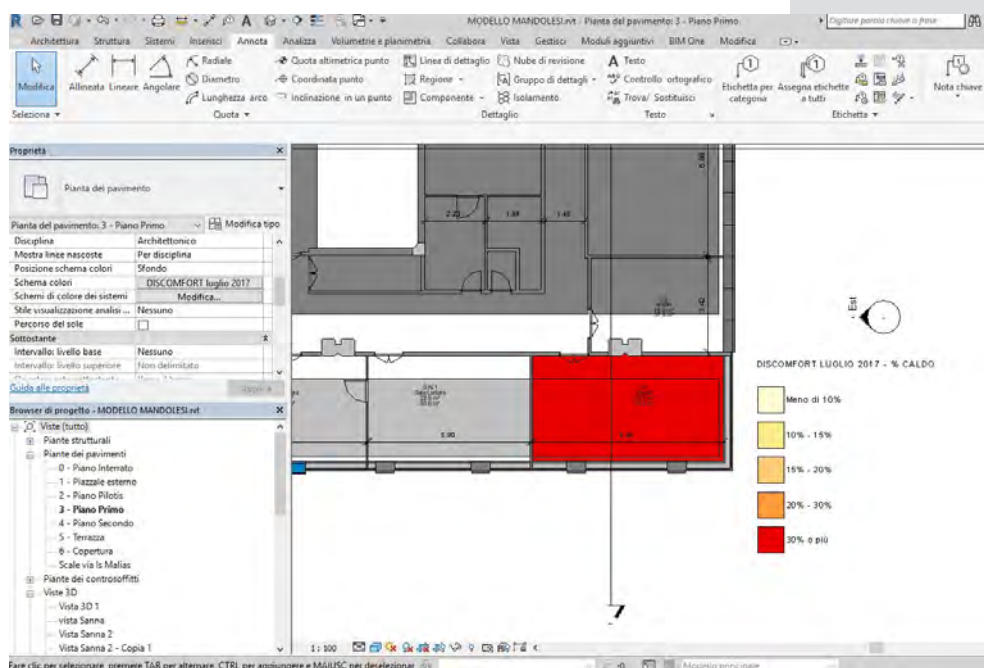


Figure 14. Room schedule and color schemes for reporting discomfort situations in July 2017.

5. CONCLUSIONS

Building information modelling can provide a valid support to all the phases of retrofit process. It is evident that BIM can be also a fundamental instrument of information management in the knowledge phase, preliminary to any design proposal, also from the energy point of view. Besides all the information that can be gathered and stored regarding the existing envelope and systems, the paper shows that the model can manage and represent data on indoor hygrothermal

selezionato i valori appropriati per va (0,1 m/s per gennaio e 0,12 per luglio) e CLO (1 per gennaio e 0,5 per luglio, a causa dei diversi livelli di abbigliamento ipotizzabili). A gennaio pochissimi punti sono al di sotto del minimo accettabile, mentre a luglio un numero cospicuo di punti si trova sulla destra dell'area comfort. Questa rappresentazione fornisce una panoramica immediata dei dati misurati, tuttavia non consente di associarli al momento dell'acquisizione. Una rappresentazione alternativa è rappresentata nelle figure 9 e 10. In questi casi è possibile identificare

comfort, too. To reach such a goal, it is necessary that a widespread network of monitoring devices is installed. PRELuDE³ project is testing at the moment a system on the case study of Mandolesi Pavilion in Cagliari, able to collect continuously data at least on the basic comfort parameters (air temperature and humidity). Human response at environmental condition is not, however, a simple phenomenon and it is influenced also by other variables. It can be correctly represented only by the use of complex indexes, among which the Predicted Mean Vote is the most frequently employed.

The methodology proposed in the paper provides a simplified workflow for the management of all the data necessary for the assessment of comfort or discomfort conditions during the energy audit process. It shows how it is possible linking the informative model with the data coming from sensors. The first gives useful information on activities carried out in indoor space and can define the PMV thresholds that depend on building use. The latter provide data on environmental parameters and on the period of monitoring on which statistical clothing insulation and air velocity values depend. Starting from these inputs, it is possible to evaluate the occurrence of comfort or, otherwise, the reasons for a probable discomfort sensation from occupants.

The graphs drawn for the case study highlights in a very effective and immediate way that in the monitored room during a winter month, comfort conditions are very often reached while during July the discomfort hours are predominant. Under such conditions, the analyses of energy consumption must necessarily take into account the absence of required thermal quality of the spaces, due probably to an underutilization of cooling systems.

The described study also shows that the comfort temperature range is not fixed, but can sensibly vary from winter to summer and, even in the same month, it can oscillates because of the influence of the other variable, firstly by the humidity. It is well known by the theories on comfort, but it should not be forgotten that still today HVAC systems have generally only one set-point, fixed on a given temperature in summer and in winter. From this point of view the study can give an interesting contribution also on more functional algorithms for systems setting.

The next step of the research activity will be the comparison between the comfort indexes calculated by the simplified methodology and by a certified microclimatic monitoring device. Small sensors can bring a dramatic increase of the number of data acquired, but their quality need to be cautiously verified. Also the estimation of some environmental variable, such as MRT, will be improved. The 3D model can give useful information regarding the geometry of the spaces. Together with the use of suitable algorithm to evaluate the

i giorni in cui il comfort non si rileva. Le linee tratteggiate rappresentano la temperatura corrispondente a PMV_{li} e PMV_{hi} per un'umidità relativa uguale a quella misurata. Il foglio di calcolo conta il numero di punti all'interno e all'esterno delle aree di comfort, identificando anche la loro posizione relativa.

A gennaio solo il 7,8% delle ore supera i limiti di comfort mentre a luglio il comfort è raggiunto solo per il 38,6% del tempo. All'interno del modello informativo sono stati strutturati i dati rilevati dai sensori e le relative elaborazioni. La creazione di un abaco dei locali ha consentito la capitalizzazione di dati storici registrati dai sensori e dei diagrammi circa il livello di comfort associato ai vari locali dell'edificio. Nella figura 11 si possono individuare le temperature registrate nel locale esposto a nord sia nel mese di luglio 2017 che nel mese di gennaio 2018.

Nella figura 12, invece, si può notare che l'abaco dei locali contiene dei parametri che consentono di capitalizzare anche i diagrammi che rappresentano molto chiaramente le condizioni di comfort dello stesso locale rispetto ai limiti richiesti.

Infine l'utilizzo, all'interno dell'abaco dei locali creato, di schemi colore ha consentito di fornire una visualizzazione immediata delle situazioni di disagio all'interno dei locali sensorizzati.

5. CONCLUSIONI

La creazione di modelli informativi può fornire un valido supporto a tutte le fasi del processo di retrofit. È evidente che il BIM può essere anche uno strumento fondamentale di gestione delle informazioni nella fase di conoscenza, preliminare a qualsiasi proposta di progetto, anche per quanto riguarda gli aspetti energetici. Oltre a tutte le informazioni che possono essere raccolte e memorizzate riguardo all'involucro e agli impianti esistenti, il contributo mostra che nel modello informativo possono essere gestiti e rappresentati anche i dati sul comfort igrotermico interno. Per raggiungere tale obiettivo, è necessario installare una rete capillare di sensori di monitoraggio. A tal proposito, con il progetto PRELuDE³, al momento si sta testando un sistema di monitoraggio sul caso studio del Padiglione Mandolesi a Cagliari, in grado di raccogliere dati continui almeno sui parametri di base del comfort (temperatura e umidità dell'aria). La risposta umana alle condizioni ambientali non è, tuttavia, un fenomeno semplice ed è influenzata anche da altre variabili. Tale risposta può essere rappresentata correttamente solo mediante l'uso di indici complessi, tra cui il più frequentemente impiegato è il "voto medio previsto".

La metodologia proposta nel presente contributo fornisce un flusso di lavoro semplificato per la gestione di tutti i dati necessari per la valutazione delle condizioni di comfort o discomfort durante il

temperatures of indoor surfaces it could bring to a more precise assessment of mean radiant temperature and, thus, of comfort complex indexes. The correlation between energy consumption and comfort conditions can be also investigated. In the case study currently also sensor acquiring information on electrical consumption are installed. Linking these data with comfort could bring to an assessment of the quality of heating and cooling system and on their use profile.

One of the most ambitious future challenges for the research will be the automation of the workflow, reducing the transfer of data towards and from datasheets and implementing the potentiality of visual programming of BIM applications. It is a key step toward the creation of instruments that can be used also by non expert operators.

6. REFERENCES

- [1] Scherer, R. J., Katranuschkov, P. BIMification: How to create and use BIM for retrofitting. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 38: 54-66.
- [2] McArthur, J. J. A building information management (BIM) framework and supporting case study for existing building operations, maintenance and sustainability. *Procedia Engineering*, 2015, 118: 1104-1111.
- [3] Entzian K., Scharmann R., BIM for existing buildings, in: A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz (Eds.), *Building Information Modeling*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, pp. 371-383.
- [4] EN 16247-1:2012. *Energy audits – Part 1: General requirements*.
- [5] Lam, A. H., Yuan, Y., Wang D., *An occupant-participatory approach for thermal comfort enhancement and energy conservation in buildings*. In: Proceedings of the 5th international conference on Future energy systems. ACM, 2014. p. 133-143.
- [6] ISO 7730:2005. *Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*
- [7] EN ISO 7726:2001. *Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities*.
- [8] Di Giuda, G. M., et al. "Preliminary definition of an energy monitoring for the implementation of a cognitive building. The "Mandolesi Pavillon" at the University of Cagliari." *Colloqui. AT e 2017-Demolition or reconstruction?*. 2017.
- [9] <http://www.sardegna.ricerche.it/index.php?xsl=370&s=358945&v=2&c=15067&nc=1&sc=>.
- [10] Fanger, P. O., et al. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering., 1970.
- [11] De Dear, R.J.; Brager, G. S., Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and buildings*, 2002, 34.6: 549-561.
- [12] MC Cartney, K. J.; Nicol, J. F., Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and buildings*, 2002, 34.6: 623-635.
- [13] EN 16798-1:2019. *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6*.
- [14] Quaquero, E., Sanna, A., Monni, G., The "Mandolesi Pavilion": an information model for a process of integrating multidisciplinary knowledge. *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture*, 2017, 3.1: 112-123.
- [15] Da Silva, M. G., Santana, M. M., Sousa, J. A., Uncertainty Analysis of the Mean Radiant Temperature Measurement based on Globe Temperature Probes. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2018.
- [16] Ricciu R., Desogus G., Sitzia G., *Metodo e sistema di valutazione e controllo delle condizioni di comfort climatico abitativo*. Brevetto UB2015A005606, 2018.

processo di audit energetico. Essa mostra come sia possibile collegare il modello informativo con i dati provenienti dai sensori. Il modello fornisce informazioni utili sulle attività svolte nello spazio interno e può definire le soglie PMV che dipendono dall'uso dell'edificio. I sensori forniscono dati sui parametri ambientali e sul periodo di monitoraggio cui sono legati i valori statistici dell'isolamento dell'abbigliamento e della velocità dell'aria. A partire da questi input, è possibile valutare il verificarsi di situazioni di comfort o, altrimenti, i motivi di una probabile sensazione di disagio da parte degli occupanti. I grafici disegnati per il caso studio evidenziano in modo molto efficace e immediato che nella stanza monitorata durante un mese invernale, le condizioni di comfort sono molto spesso raggiunte mentre a luglio le ore di disagio sono predominanti. In tali condizioni, l'analisi del consumo di energia deve necessariamente tenere conto dell'assenza di qualità termica richiesta negli spazi, probabilmente a causa di una sottoutilizzazione dei sistemi di raffreddamento. Lo studio descritto mostra anche che l'intervallo di temperatura di comfort non è fisso, ma può variare sensibilmente dall'inverno all'estate e, anche nello stesso mese, può oscillare a causa dell'influenza delle altre variabili, prima tra tutte dell'umidità. Ancora oggi i sistemi HVAC hanno generalmente un solo set-point, fissato su una data temperatura in estate e in inverno. A partire da tale considerazione, è piuttosto evidente che lo studio presentato possa dare un contributo interessante anche su algoritmi più funzionali per l'impostazione dei sistemi.

Il prossimo passo dell'attività di ricerca sarà il confronto tra gli indici di comfort calcolati con la metodologia semplificata e con un dispositivo di monitoraggio microclimatico certificato. I sensori miniaturizzati possono portare ad un notevole aumento del numero di dati acquisiti, ma la loro qualità deve essere attentamente verificata. Anche la stima di alcune variabili ambientali, come MRT, sarà migliorata. Il modello virtuale può fornire informazioni utili sulla geometria degli spazi. Insieme all'utilizzo di un algoritmo adeguato per valutare le temperature delle superfici interne, si potrebbe arrivare ad una valutazione più precisa della temperatura media radiante e, quindi, degli indici complessivi di comfort. Inoltre potrà essere analizzata la correlazione tra consumo di energia e condizioni di comfort. Nel caso studio sono attualmente installati anche sensori che acquisiscono informazioni sul consumo elettrico. Il collegamento di questi dati con il comfort potrebbe portare ad una valutazione della qualità del sistema di riscaldamento e raffreddamento e del loro profilo d'uso.

Una delle sfide future più ambiziose per la ricerca sarà l'automazione del flusso di lavoro, la riduzione del

- [17] Natephra W., et al., Enriching Building Information Modeling (BIM) with sensor data and thermal images for thermal comfort analysis. In: *PLEA Passive Low Energy Architecture Design to Thrive*, 2017.
- [18] Alfano d'Ambrosio F. R., Palella B. I., Riccio G., The role of measurement accuracy on the thermal environment assessment by means of PMV index. *Building and Environment*, 2011, 46.7: 1361-1369.

trasferimento dei dati verso e dai fogli di calcolo e l'implementazione delle potenzialità della programmazione visiva delle applicazioni BIM. È un passo fondamentale verso la creazione di strumenti che possono essere utilizzati anche da operatori non esperti.