

Sviluppo di un prototipo di facciata continua con comportamento dinamico (SmartSkin)

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Luca Guardigli^a, Francesco Della Fornace^a, Oscar Casadei^b, Fabio Frani^b, Luca Nicolini^b, Gian Marco Revel^c, Marco Arnesano^c,

^aAlma-Mater Studiorum, Università degli Studi di Bologna, Italia

^bFocchi S.p.A., Italia

^cDipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche, Italia

luca.guardigli@unibo.it
francesco.dellaformace@gmail.com
o.casadei@focchi.it
f.frani@focchi.it
gm.revel@staff.univpm.it
m.arnesano@univpm.it

Abstract. L'articolo presenta un progetto di ricerca, frutto di una collaborazione tra Università e società produttrici e di progettazione con esperienza internazionale in facciate continue e sistemi HVAC. La ricerca è consistita nella sperimentazione di una soluzione tecnologica d'involucro evoluto a comportamento dinamico ed alta resa estetica, in grado di rispondere all'influenza di fattori fissi e variabili – esterni ed interni – nel rispetto dei requisiti previsti dalle norme e ad esigenze di flessibilità in fase progettuale e d'uso. L'obiettivo è di ridurre l'energia inglobata nei componenti, ottimizzare l'uso di energia in fase operativa e diminuire i costi di costruzione con la segmentazione impiantistica, l'abbassamento dell'altezza d'interpiano e la velocizzazione della messa in opera.

Parole chiave: Facciata continua dinamica; Componenti *plug&play*; Macchine termiche integrate; Adattivo; Smart.

Introduzione

Le facciate continue o a cortina (*curtain walls*) sono caratterizzate da componenti omogenei relativamente leggeri e metallici, con ampie superfici trasparenti e tipicamente esterni alla struttura portante dell'edificio. Fin dall'inizio del loro impiego, nel XIX secolo, queste facciate sono state determinanti nella caratterizzazione architettonica degli edifici e oggetto di continua innovazione tecnologica (Sinopoli e Tatano, 2002). Negli ultimi anni l'innovazione si è concentrata sul concetto di adattamento alle condizioni climatiche esterne (Al-Obaidi, Azzam Ismail, Hussein e Abdul Rahman, 2017) e alle esigenze degli utenti e nella quasi totalità dei casi questo adattamento si è manifestato attraverso l'impiego di strategie passive, cioè di soluzioni tecniche, anche dinamiche (Sala e Romano, 2011; Perino e Serra, 2015; Velasco, Brakke e Chavarro, 2015), che non facessero uso di impianti termici integrati. Recentemente sono stati introdotti componenti

Development of a curtain wall prototype with dynamic behaviour (SmartSkin)

Abstract. The paper presents a research project, derived from a collaboration between Universities, manufacturers and designers with international experience in curtain walls and HVAC systems. The research consisted in experimenting a technological solution for a building envelope with dynamic behaviour and high aesthetic value, which is able to respond to the influence of fixed and variable factors – internal and external – with respect to regulatory requirements and flexibility needs during the design and the operational phase. The goal is to reduce the embodied energy of the components, optimise the energy consumption during the use phase and limit the construction costs with the segmentation of the devices, the shrinkage of the floor height and the acceleration of the assembly process.

Keywords: Dynamic curtain wall; Plug and play components; Integrated thermal machines; Adaptive; Smart.

attivi, per esempio nuovi tipi di cellule fotovoltaiche, con questo scopo. Nonostante ciò, l'impiego di macchine termiche e/o scambiatori di calore è stato sempre limitato a pochi esempi significativi (Loonen, Favoino, Hensen, Overend, 2017). Il motivo di ciò risiede principalmente nel fatto che le soluzioni impiantistiche centralizzate sono considerate più efficienti ed anche di più facile gestione, specialmente negli edifici di grande dimensione. Pur considerando questi aspetti, la possibilità da parte dei singoli utenti di variare in modo personalizzato le condizioni climatiche interne e gestire economicamente gli impianti nel loro ciclo di vita può essere oggi motivo di interesse, considerando anche la possibilità di operare componenti a distanza con sistemi di tipo domotico (Sung, 2016). Impianti di piccole dimensioni e del tipo *plug&play* possono costituire elementi di riduzione dell'impatto ambientale se gestiti in modo diretto e personalizzato (Nguyen e Aiello, 2013). Il comfort termico è infatti condizione soggettiva e non oggettiva (ASHRAE, Standard 55, 2013).

Facciate continue dinamiche con macchine integrate: stato dell'arte

Lo sviluppo tecnologico di facciate continue con macchine termiche integrate fino a un livello di maturità tecnologica del tipo TRL7 (*system prototype demonstration in operational environment*), TRL8 (*system complete and qualified*) o anche TRL9 (*actual system proven in operational environment*) è degli inizi degli anni 2000. L'analisi condotta su brevetti nei quali siano pre-

Introduction

Curtain walls are made of relatively light and homogenous metal components, with wide transparent surfaces and typically external to the structure of the building. Since the beginning of their employment in the XIX century, these façades were crucial in characterizing the architecture of the buildings and subject to continuous technological innovation (Sinopoli and Tatano, 2002). In the last years the innovation was focused on the concept of adaptation to the external climatic conditions (Al-Obaidi, Azzam Ismail, Hussein e Abdul Rahman, 2017) and to the users' needs, and in almost all the cases this adaptation was revealed through the use of passive strategies, that is technical solutions – dynamic also – (Sala and Romano, 2011; Perino and Serra, 2015; Velasco, Brakke and Chavarro, 2015), which don't make

use of integrated heating systems. Active components have been recently introduced for this goal: for instance, new types of photovoltaic cells. Nevertheless, the use of heat generators and/or exchangers has been always limited to a few significant examples (Loonen, Favoino, Hensen, Overend, 2017). The reason primarily lies in the fact that central systems are considered more efficient and also easier to be managed, especially in large buildings. Even if we take into consideration these aspects, the opportunity for single users to personally modify the internal climatic conditions and economically manage the building services during their life cycle can be object of interest today, considering the possibility to operate components remotely with automated systems (Sung, 2016). Small plug and play systems may represent elements for the reduction of the environmental

senti le parole chiave *curtain wall* o *façade* insieme a *condenser* o *evaporator* o *heat pump* o *compressor* o *ventilation* ha prodotto solo due risultati certi: uno negli Stati Uniti a nome di Curtis Kossmann (US9273463) e uno internazionale (WO2006/000159), ora di proprietà cinese. Altri brevetti sono risultati scaduti. Il brevetto americano ha le seguenti caratteristiche: una parete esterna e una parete interna, che definiscono fra loro uno spazio interno di larghezza non superiore circa a 0,7 metri, un telaio, un ingresso ed un'uscita d'aria, sensori di temperatura e uno scambiatore di calore. Il documento cinese sembra descrivere un elemento di facciata associato ad un sistema di condizionamento dell'interno dell'edificio. Tale sistema di condizionamento include un'unità di condensazione, un'unità di evaporazione, una sezione d'entrata per l'espulsione dell'aria dalla unità di evaporazione verso l'interno dell'edificio e una sezione di uscita dell'aria verso l'esterno.

Entrambi i brevetti identificano il tipo di facciata in questione ma non sembrano precludere lo sviluppo di sistemi innovativi con assetti simili. Vi sono alcuni casi significativi di facciate continue di tipo adattivo e dinamico, prodotte e messe in opera con sistemi termici integrati che includono questi elementi, sebbene sviluppate senza brevetto.

Il primo caso è costituito dalla facciata continua TEmotion (Centro di formazione Wicon a Bellenberg, Hydro Building Systems-Wicon, 2005), che presenta una cellula completamente prefabbricata, costituita da una sezione trasparente, in cui sono integrati gli elementi per l'ombreggiamento e per lo sfruttamento della luce naturale, e da una sezione opaca in cui sono integrati i componenti impiantistici e le celle fotovoltaiche. La facciata – considerata ventilata – è in grado di integrare i dispositivi per

il controllo di ventilazione, riscaldamento, aria condizionata, illuminazione artificiale, luce naturale ed energia prodotta dalle celle fotovoltaiche (Fig. 1). L'impiego di una tecnologia di connessione *plug&play* consente un elevato grado di modularità: i cablaggi al suo interno sono infatti rimovibili e ridotti fino al 60%, in modo che i progettisti o gli occupanti possano scegliere se installare o meno un particolare dispositivo sin da subito o nel corso del tempo. La ventilazione meccanica, il riscaldamento e il condizionamento dell'aria sono integrati all'interno di un elemento di dimensioni 30 x 40 x 130 cm, mentre l'unità di controllo ha dimensioni 20 x 15 x 45 cm. Un sistema di adattatori controlla l'effettivo apporto di luce naturale con il livello richiesto dall'utente, mentre l'apertura automatica di elementi di facciata permette di raffreddare l'ambiente con la ventilazione notturna, riducendo i costi legati al condizionamento dell'aria. La regolazione dei dispositivi può essere effettuata tramite un sistema di controllo centralizzato oppure dall'utente stesso; il sistema raccoglie informazioni in tempo reale e le invia al sistema centrale di manutenzione, in maniera tale da intervenire prontamente in caso di malfunzionamento. La facciata TEmotion presenta il vantaggio di adattarsi a qualsiasi piano di costruzione in quanto le dimensioni e la disposizione dei singoli componenti possono essere regolati a seconda degli ingombri, ma non contiene un vero e proprio alloggiamento per una macchina del tipo HVAC, bensì uno scambiatore di calore dell'aria in entrata e in uscita.

Nel caso di Smartbox (progetto di R&D, partner ECN, cepezed, TNO Bouw & Ondergrond, Level Energy Technology, Glaverbel Westland, van der Vlugt, 2006) la facciata include diversi dispositivi: la Smartbox (Fig. 2), le veneziane interne riflettenti, pannelli in vetro sottovuoto e pannelli in vetro semi-trasparente

impact if personally and directly managed (Nguyen e Aiello, 2013). Thermal comfort is, in fact, a subjective condition, not an objective one (ASHRAE, Standard 55, 2013).

Dynamic façades with integrated building services: state of the art

The technological development of curtain walls with integrated thermal machines up to a Technology Readiness Level (TRL) 7 (system prototype demonstration in operational environment), TRL 8 (system complete and qualified) or even TRL9 (actual system proven in operational environment) dates back to the beginning of the 2000s. The analysis of the patents in which the keywords curtain wall or façade are present together with the words condenser, evaporator, heat pump, compressor or ventilation has produced only two certain re-

sults: one in the United States associated to the name of Curtis Kossmann (US9273463) and an international one (WO2006/000159), now owned by Chinese. Other found patents have expired. The American patent shows the following features: one internal and one external partition, which contain an inner space with a thickness of no more than 0.7 meters, a frame, an air inlet and an air outlet, temperature sensors and a heat exchanger. The Chinese document seems to describe a façade element associated to a conditioning system for the whole building. Such a conditioning system includes a condensation unit, an evaporating unit, an inlet section for the air extraction from the evaporating unit towards the inside of the building and an air outlet to the outside. Both patents identify the façade but don't prevent the development of other

innovative systems with similar equipment. There are some significant cases of adaptive and dynamic walls produced and assembled with integrated thermal systems which include these elements, but they were developed without any patent.

The first case is represented by the TEmotion façade (Wicon Education Center in Bellenberg, Hydro Building Systems-Wicon, 2005), which shows a totally prefabricated cell, made of a glazed part with integrated shading elements and elements for natural light control and an opaque part with integrated mechanical systems and photovoltaic units. The façade is ventilated and provides integrated devices for ventilation, air-conditioning and heating, artificial light and photovoltaic energy (Fig. 1). The use of a connecting plug and play technology brings high modularity to the system: the wiring

inside is reduced down to 60%, so that designers and occupants can decide to install any device at the beginning or later on. The mechanical ventilation and the HVAC system are integrated inside a space of 30 x 40 x 130 cm, while the dimensions of the control unit are 20 x 15 x 45 cm. A system of adaptors is set to control the effective contribution of natural light according to the level requested by the user, while the automated motion of the façade provides space cooling through night ventilation, reducing air conditioning costs. The regulation of the devices is carried out by a central control system or by the user; the system collects real time information and send it to a centralised maintenance system to support operations in case of malfunction. The advantage of the TEmotion façade is that it is adaptable to any building story, because its dimensions and the

01 | Facciata TEmotion, con sezione trasparente al centro e sezioni opache ai lati per l'alloggiamento dei sistemi impiantistici. Foto, Wicona, per gentile concessione
TEmotion façade, with the glazed part in the middle and the opaque parts at its side to host the mechanical systems



02 | Ingombro della Smartbox per l'alloggiamento nella fascia interpiano
Dimensions of Smartbox to be placed in the space between floor and ceiling

03 | Facciata della Capricorn Haus. Foto Frank Vincentz, lic. Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
The façade of the Capricorn Haus

con celle fotovoltaiche. L'unità Smartbox, posizionata nella fascia interpiano, è un sistema decentralizzato che combina raffrescamento adiabatico, riscaldamento e ventilazione bilanciata; esso presenta la mandata e uscita dell'aria a soffitto anziché a pavimento. Il limite di questa soluzione risiede proprio nell'aver una cattiva distribuzione dell'aria nel periodo invernale. I progettisti assicurano un abbattimento del consumo energetico globale di oltre il 50% rispetto a una facciata continua standard, se combinato con un elevato isolamento termico, una bassa permeabilità all'aria, ombreggiamento, controllo del flusso d'aria attraverso uno scambiatore di calore e integrazione con il fotovoltaico. Il sistema decentralizzato viene promosso in quanto in grado di evitare l'installazione di pavimenti flottanti, facendo risparmiare fino al 12% dell'altezza del solaio e dei costi della facciata. Ad oggi la facciata Smartbox Energy è un insieme di dispositivi integrati che possono essere combinati con differenti facciate continue mediante interfacce modulari. Tuttavia la connessione tra la facciata ospitante e l'unità Smartbox non è stata definita in maniera chiara e non sono state sviluppate le problematiche legate al fuoco. Per questi motivi una facciata Smartbox non è entrata mai in produzione.

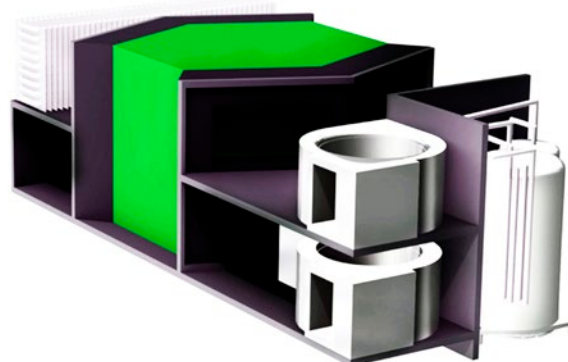
La facciata della Capricorn Haus a Düsseldorf (progetto di Schossig e Gatermann, partner Schüco, 2007) è stata disegnata specificatamente per l'edificio che l'alloggia, sulla base di un sistema di cellule Schüco. Essa è costituita da unità di dimensioni 2,70 x 3,35 m che permettono la ventilazione decentralizzata. Ogni cellula è caratterizzata da una parte vetrata a tutt'altezza e,

arrangement of the single components can be regulated depending on the size of the obstacles. However, it does not contain any real slot for the HVAC system, but just the air inlet and outlet with a heat exchanger.

In the case of Smartbox (project R&D, partners ECN, cepezed, TNO Bouw & Ondergrond, Level Energy Technology, Glaverbel Westland, van der Vlugt, 2006) the façade includes several devices: Smartbox unit (Fig. 2), reflective internal blinds, glazed vacuum-sealed panels and semi-transparent glazed panels with photovoltaic cells. The Smartbox unit, positioned in the space between the floor and the ceiling, is a decentralized system which combines adiabatic cooling, heating and balanced ventilation; the air inlet and outlet are placed in the ceiling instead of on the floor. In fact, the drawback of this solution is its scarce air distribution dur-

ing the winter period. The designers ensure to reduce the energy consumption by more than 50%, as compared to a standard façade, if the system is combined with an elevated thermal insulation, a low air permeability, sun shading, air flow control through the heat exchanger and it is integrated with PV. The system is particularly suitable, since it avoids the installation of raised floors, saving up to 12% of floor height and façade costs. Today the Smartbox Energy façade is a compound of integrated devices that can be combined with different curtain walls through modular interfaces. However, the connection between the hosting façade and the Smartbox unit and the fire safety aspects have not been defined clearly. For these reasons not a single Smartbox façade has ever been produced.

The façade of the Capricorn Haus in Düsseldorf (project by Schossig e



a fianco, da un pannello opaco contenente i sistemi impiantistici (Fig. 3). Ogni vano dell'edificio ha almeno uno di questi moduli e le partizioni interne possono essere connesse alle sue estremità. La facciata è dotata dei seguenti dispositivi: l'*i-module*, una finestra apribile automaticamente, una mensola interna per il controllo della radiazione solare e veneziane per l'ombreggiamento disposte nella cavità interna della facciata. Per garantire l'allineamento e la planarità della facciata, i progettisti hanno ridotto il più possibile le dimensioni dell'*i-module* (104,9 x 106,5 x 19,0 cm), cioè l'unità elettrica progettata per il riscaldamento, il condizionamento e la ventilazione decentralizzati; l'aria fresca entra nell'*i-module* attraverso una fessura richiudibile e gli occupanti possono regolarne il funzionamento in maniera autonoma.

Nella facciata E² (progetto di Stefan Behling, partner Schüco, 2007) tutti i componenti meccanici della facciata sono situati nella fascia interpiano e, per questo motivo, essa è a sbalzo e ancorata con perni speciali. Tra questi perni viene installata la scatola con le unità di ventilazione decentralizzate; una che serve il piano superiore dal pavimento e una quello inferiore dal soffitto. La protezione al fuoco è garantita da un filtro tra i due compartimenti. La progettazione modulare dei ventilatori Schüco IFV rende possibile realizzare diversi sistemi di ventilazione; infatti, a seconda delle esigenze individuali, è possibile realizzare un sistema di riscaldamento o raffreddamento dell'aria aspirata dall'esterno, con o senza recupero di calore dall'aria viziata. Inoltre, l'integrazione dei ventilatori nell'ingombro davanti al solaio consente di organizzare e configurare liberamente le facciate e gli interni. Secondo i progettisti, il sistema riduce i costi di investimento e le spese di esercizio dell'edificio: la rete dei condotti per la ventilazione dell'edificio è assente, le altezze di interpiano si

riducono e con esse anche le superfici tecniche. Le funzioni sono controllate mediante sensori; l'aerazione, per esempio, si adatta alle singole condizioni operative a seconda dei livelli di CO₂ o della concentrazione di umidità nell'aria. Altre peculiarità sono le dimensioni decisamente ridotte del modulo per il controllo della ventilazione e la sua silenziosità; infatti l'altezza di installazione media è di soli 50 mm, mentre il funzionamento produce poco meno di 26 dB (A) a un livello 1 (15 m³/h). Insieme al sistema di facciata, sono stati sviluppati anche un modulo integrato per il solare fotovoltaico e un sistema di schermatura solare CTB in grado di resistere al vento forte e nascosto dietro a un elemento di rivestimento quando represso. Non si è al corrente di sistemi di facciata simili ai precedenti prodotti in Italia.

SmartSkin: strategia progettuale e fase di sperimentazione

la regione Emilia-Romagna con fondi per Innovazione e Ricerca POR-FESR 2014-2020, è stato quello di sondare le potenzialità offerte dall'integrazione di macchine termiche in facciata con un sistema semplice ed efficace. L'obiettivo del gruppo di ricerca, coordinato da Focchi Spa e con partner l'Università di Bologna (CIRI Edilizia e Costruzioni), l'Università Politecnica delle Marche (Univpm) e BlueBox, era di realizzare un prototipo di facciata continua che integrasse le funzionalità tipiche dell'involucro – in particolare la tenuta all'aria e all'acqua e l'isolamento termico e acustico – con le funzionalità dei sistemi domotici, attraverso un'attenta analisi delle prestazioni raggiungibili in termini energetici e di comfort (Fig. 4), anche tramite l'uso del Comfort Eye di

Sulla base delle analisi condotte sul funzionamento degli esempi appena citati, l'intento del progetto SmartSkin, finanziato dal-

Gatermann, partner Schüco, 2007) has been designed specifically for the this building, on the basis of a system of cells made by Schüco. It is composed by units of 2.70 x 3.35m with decentralized ventilation. Each cell is characterized by a full height glazed part and an opaque panel at its side containing all the mechanical systems (Fig. 3). Each room of the building has at least one of these modules and the internal partitions can be connected at its extremities. The façade is equipped with the following devices: the *i-module*, a window with automated openers, an internal shelf for solar radiation control and venetian blinds for shading in the internal cavity of the façade. In order to guarantee its alignment and its planarity, the designers have significantly reduced the dimensions of the *i-module*, that is the electrical unit designed for the

decentralized heating, air conditioning and ventilation systems (104.9 x 106.5 x 19.0 cm). The fresh air enters in the *i-module* through shutters and the occupants can autonomously regulate its functions.

In the E² façade (project of Stefan Behling, partner Schüco, 2007) all the mechanical components are placed in the space between the floor and the ceiling and for this reason it is suspended and anchored with special pins. The box with the decentralized ventilation units is installed in the space between the pins: one unit serves the upper room from the floor, the other the room below from the ceiling. The fire safety is guaranteed by a filter between the two components. The modular design of Schüco IFV ventilators allows to realize different systems; in fact, according to the individual requests, it is possible to create a heat-

ing or cooling system extracting the air from the outside, with or without heat recovery from polluted air. Besides, the integration of the ventilators in the space facing the floor allows to freely organize and configure the façade and the internal spaces. According to the designers, the system reduces investment costs and building operating costs: the set of ventilation ducts is not present, the floor heights are reduced and the façade area with them. The functions are controlled through sensors. The ventilation, for instance, is adapted to the singular operating conditions depending on CO₂ levels or air humidity.

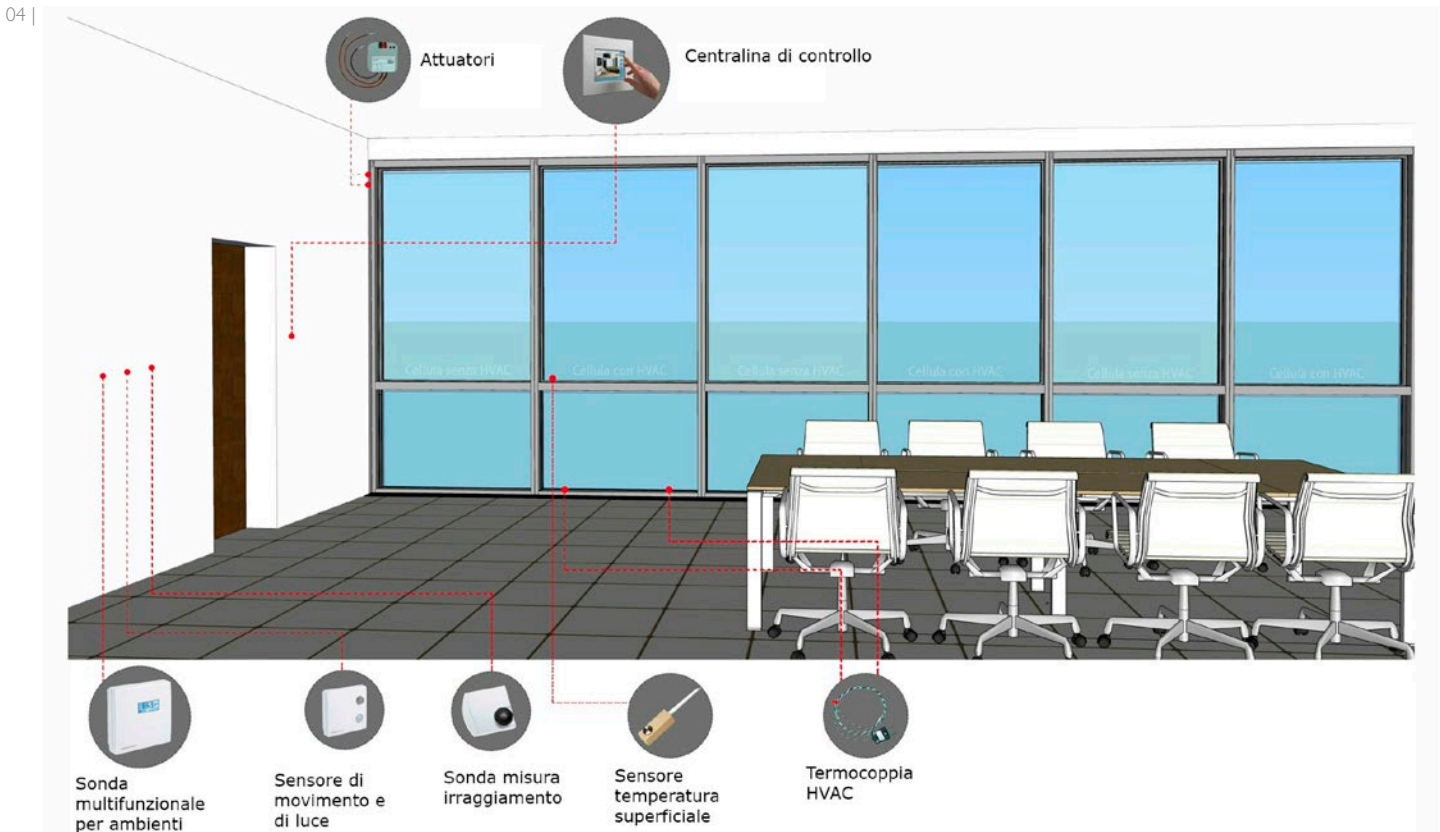
Other peculiarities are the significantly reduced dimensions of the module for ventilation control and its quietness; in fact, the mean height of the equipment is only 50 mm, while the noise produced at level 1 of operation (15

m³/h) is little less than 26 dB (A). Together with the façade system, an integrated module for photovoltaics and the wind resistant CTB solar shading system, hidden behind the cladding when closed, have been developed. We are not aware of similar façade systems produced in Italy.

SmartSkin: design strategy and experimental phase

Following the investigation on the above mentioned examples, the goal of the SmartSkin project, financed by the Emilia-Romagna region with innovation and research funds POR-FESR 2014-2020, was to test the potentialities offered by the integration of thermal machines with a simple but effective façade system.

The goal of the research group, coordinated by Focchi Spa with the University of Bologna (CIRI Edilizia e Cos-



UNIVPM (Revel et al., 2014) in compliance with ISO 7726, for several positions inside the space. Together with T_r , the variables required by ISO 7730 are measured to calculate the predicted mean vote (PMV per il controllo dei valori PPD e PMV). Il prototipo di SmartSkin realizzato ha previsto lo studio di una soluzione di facciata a celle (*unitized systems*) chiamate Smart

Envelope Units (SEU), in grado di ospitare all'interno un sistema a pompa di calore invertibile per la produzione di caldo e freddo (HVAC), alloggiabile nell'interpiano tra una SEU e l'altra in quanto di ridottissima dimensione. Per validare il progetto è stato realizzato un *mock-up* dimostratore in scala reale, installando il prototipo a chiusura di una camera

truzioni), the Polytechnic University of Marche ((UNIVPM) and BlueBox as partners, was to realize a curtain wall prototype which could integrate the typical functions of the envelope – air tightness, waterproofing and thermal and acoustic insulation – with the functionalities of automated systems, through an accurate analysis of the achievable performances in terms of energy consumption and comfort (Fig. 4), also using the Comfort Eye by UNIVPM (Revel et al., 2014) in compliance with ISO 7726, for several positions inside the space. Together with T_r , the variables required by ISO 7730 are measured to calculate the predicted mean vote (PMV for the control of PPD e PMV). The realized SmartSkin prototype has provided for the study of a solution façade made of cells (*unitized systems*), named Smart Envelope Units (SEU),

which are able to host a very small invertible heat pump inside (heating and cooling), in the space between one SEU and the other. A full scale mock-up has been realised for demonstration and project validation. The façade prototype was placed to fill one side of a testing box with insulated walls on the other three sides and was provided with sensors in order to acquire output data to be confronted with performance targets (Fig. 6). Some fundamental parameters have been then considered for the complete and accurate monitoring of comfort and energy efficiency of the prototype: internal air temperature (evaluated at two different heights from the floor to consider both the sitting or standing condition of the occupants; air velocity of the internal space (at two different heights); mean radiant temperature inside the demonstrator (at two different

heights); inlet and outlet air temperature and velocity; thermal flow rate through the opaque walls of the demonstrator: external air temperature and velocity; internal and external humidity; solar radiation. Thermal tests have been conducted to evaluate the heat exchange through the cell, an acoustic test to evaluate the noise of the equipment and tests on the internal climate to evaluate the efficiency and the effectiveness of the systems (Fig. 6). The goal of the prototype testing phase consisted in verifying the achievement of the performance levels of the two modules identified during the design phase. Following the actual national legislation and the requirements identified by the product regulations for curtain walling (UNI EN 13830:2015) the performance goals have been identified. Regarding the energy aspect, satisfying the comfort situations in the worst

operating conditions has led to an energy consumption of around 4 kWh, against 2 kWh in the days of september. Without describing the copious numerical results for lack of space, the main detected problems in modelling and testing are reported below. Some difficulties have been observed in evaluating the U_{man} value (U_{cw}) of the cell, considering the tri-dimensional configuration and its dynamic functions; the problem has been solved with a Fluid Dynamic model, later simplified, weighting the obtained values in various points. Some difficulties have been noticed in the acoustic and thermal insulation of the devices and in optimizing the air intake inside the room in relation to the power of the ventilators and the orientation of the air deflectors; the problem of mixing the air flow in the farthest zones of the internal volume was partially solved

di prova con pareti isolate negli altri 3 lati, provvista di sensori per effettuare i test da cui ricavare gli output da confrontare con i target prestazionali (Fig. 5). Sono stati dunque presi in considerazione i parametri fondamentali per un monitoraggio completo e accurato del comfort e dell'efficienza energetica del prototipo: temperatura dell'ambiente interno (valutata a due differenti altezze dal pavimento per considerare la condizione degli occupanti in piedi o seduti); velocità dell'aria dell'ambiente interno (a due altezze differenti); temperatura media radiante all'interno del dimostratore (a due altezze differenti); temperatura e velocità dell'aria in mandata e ripresa della macchina; flusso termico attraverso le pareti opache del dimostratore; temperatura e velocità dell'aria dell'ambiente esterno; umidità dell'ambiente interno ed esterno; radiazione solare. Sono stati condotti test termici per valutare lo scambio di calore attraverso la cellula, un test di tipo acustico per valutare la rumorosità degli impianti e test sul clima interno, per valutare l'efficienza e l'efficacia degli impianti (Fig. 6).

L'obiettivo della fase di collaudo del prototipo realizzato è consistito nella verifica del raggiungimento delle performance dei due moduli di facciata identificati in fase di progettazione. Sulla base della legislazione vigente a livello nazionale e dei requisiti previsti dalla norma di prodotto per le facciate continue (UNI EN 13830:2015) sono stati individuati gli obiettivi prestazionali (Tab. 1):

Dal punto di vista energetico il soddisfacimento dei livelli di comfort desiderati nelle condizioni più estreme di funzionamento ha comportato un consumo energetico di circa 4 kWh, contro i circa 2 kWh nelle giornate di settembre. Senza poter descrivere i numerosi risultati numerici ottenuti per mancanza di spazio, si riportano le principali problematiche riscontrate nella



modellazione e nei test. Sono state rilevate difficoltà nella valutazione dei valori di trasmittanza $U_{\text{medio}} (U_{\text{cw}})$ della cella (Fig. 7), considerando la conformazione tridimensionale e il suo funzionamento dinamico; si è risolto il problema sviluppando un mo-

Requisito prestazionale	Elemento interessato	Obiettivo prefissato	Norma di riferimento
Sicurezza Antincendio	Isolamento esterno modulo HVAC: lana di roccia	Classe B-s3-d0	Lettera circolare 15/04/2013, n. 5043 - Aggiornamento
Permeabilità all'aria	Facciata SmartSkin	Classe A4: Pressione massima P_{max} (Pa): 600 Permeabilità all'aria (m^3/mh): 0,5	UNI EN 12152:2003 UNI EN 12153:2002
Tenuta all'acqua (statica)	Facciata SmartSkin	Classe R7: Pressione massima P_{max} (Pa): 600	UNI EN 12154:2001 UNI EN 12155:2002
Isolamento acustico	Facciata SmartSkin Modulo HVAC	$D_{2\text{m,nT,w}} \geq 42$ dB (uffici e assimilabili) $LA_{\text{eq}} \leq 35$ dB Isolamento acustico HVAC standard in commercio: tra 33 e 42 dB a 2 m di distanza (sola ventilazione)	DPCM 05/12/1997 DPCM 05/12/1997
Isolamento termico	Facciata SmartSkin Vano interpiano cellula SmartSkin	$U_{\text{medio}} \leq 1,50$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ $U_{\text{medio}} \leq 0,80$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (di separazione tra unità confinanti)	DM 26/06/2015

dello fluidodinamico, poi semplificato, pesando i valori ottenuti in vari punti. Si sono notate difficoltà nell'isolare termicamente e acusticamente le macchine e difficoltà nell'ottimizzare l'immissione d'aria all'interno della camera in rapporto alla potenza dei ventilatori e all'orientamento delle alette delle griglie: il problema del mescolamento del flusso d'aria nelle zone del volume interno più distanti è stato parzialmente risolto con una speciale orientazione delle lamelle.

Alcune criticità riscontrate nello sviluppo del sistema domotico, ancora in fase di implementazione, sono rappresentate dalla gestione a distanza della pompa di calore. Attualmente il controllo elettronico della veneziana contenuta nel vetrocamera e del serramento apribile non è ancora meccanizzato.

Considerazioni finali e sviluppo della ricerca

Il sistema di facciata progettato è un prototipo che ambisce a eliminare l'impianto centrale di HVAC nell'edificio e a ridurre i lavori d'installazione ai soli tempi di collegamento elettrico tra le varie celle, aumentando la quota di prefabbricazione dell'edificio. Tramite l'integrazione del sistema facciata continua e impianto è possibile puntare ad una standardizzazione del processo produttivo, presentando vantaggi connessi a un forte aumento della quota fabbrica rispetto alla quota cantiere (riduzione di costi e tempi di installazione) e ad una possibile ristrutturazione di edifici occupati senza procurare disagi agli occupanti. La facciata è stata infatti pensata per edifici dove sono richieste flessibilità d'uso, adattabilità, segmentazione degli spazi e differenze funzionali. Grazie alla facile estraibilità delle macchine (approccio *plug&play*, oppure *on demand*), è possibile attivare un semplice servizio di gestione e manutenzio-

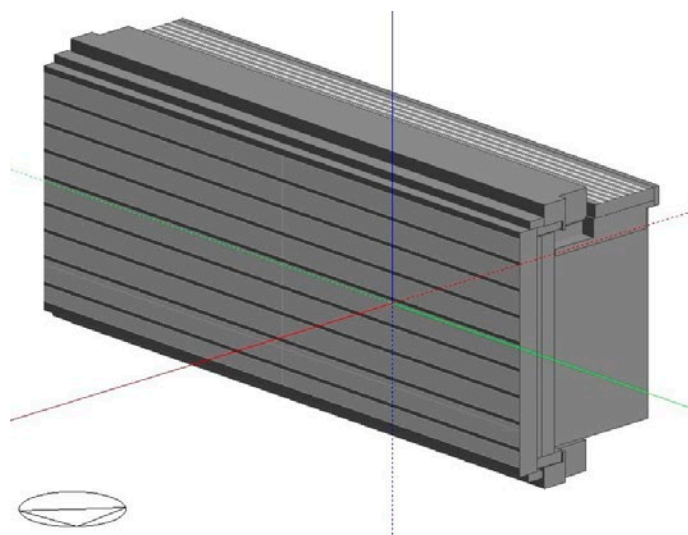
with the special orientation of the deflectors.

Final considerations and research development

The designed façade system represents a prototype which aims at eliminating the HVAC centralised system from the building and reducing the installation time to the sole electric connections with the cells, increasing the amount of the prefabricated parts in the building. Through the integration of the curtain wall with the HVAC system the standardization of the production process becomes possible, presenting advantages connected to the strong increase of prefabricated parts in comparison to components built on site (reduction of costs and installation times) and to the potential application in renovations, avoiding many inconveniences to the occupants. In fact, the façade has been

conceived for buildings where flexibility in use, adaptability, space segmentation and functional differences are requested. Thanks to the easy extractability of the devices (plug&play, or on demand approach), it is possible to activate a simple process of system management and maintenance: the equipment to be revised is taken into a laboratory, where controls and repairs can be comfortably executed in safety conditions. The inconvenience connected to the general interruption of the services for programmed maintenance or malfunction can be also avoided, being sufficient a stock of small modular devices according to the needs.

The research aimed at following the path of the adaptive envelope, in which passive and active systems, as well as information can be integrated. The strategic goals of the SmartSkin façade can be so synthesized: minimize the grey en-



ergy, or embodied energy, associated to the envelope components and the operating energy associated to the building services; pre-empt the façade performances with a dynamic remote control; speed up the production process and site construction; research technological solutions for adaptive curtain walls

of limited cost; stimulate technological innovation. The following development phase will consider further investigation to verify the effective adaptability of the system to various types of existing structures and to evaluate the environmental impact of the façade during its life cycle with a LCA procedure.

ne: le unità da revisionare vengono trasferite in laboratorio, dove possono essere eseguiti controlli e riparazioni in condizioni di comfort e sicurezza. Sono anche evitabili i disagi dovuti alle interruzioni generali del servizio per manutenzione programmata o per guasto, essendo sufficiente uno stock di piccole macchine modulabile secondo le esigenze.

La ricerca ha voluto percorrere, attraverso la sperimentazione, la strada dell'involucro adattivo, in cui tecnologie passive e attive e informazioni possano integrarsi. Gli obiettivi strategici della facciata SmartSkin si possono così sintetizzare: minimizzazione di energia grigia, o inglobata, associata alle componenti d'involucro; minimizzazione dell'energia operativa associata all'impianto; previsione di prestazioni della facciata con controllo dinamico a distanza; velocizzazione del processo produttivo e di messa in opera; potenzialità nella ricerca di soluzioni architettoniche per facciate continue adattive a costo contenuto; stimolo dell'innovazione tecnologica. La fase di ulteriore sviluppo deve prevedere un'indagine che possa far luce sull'effettiva adattabilità del sistema a vari tipi di strutture esistenti ed una valutazione dell'impatto ambientale della facciata nel ciclo di vita con procedimento LCA.

REFERENCES

- Al-Obaidi, K.M., Azzam Ismail, M., Hussein, H. and Abdul Rahman, A.M. (2017), "Biomimetic building skins: An adaptive approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 79, pp. 1472-91, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306640>.
- Loonen, R.C.G.M., Favoino, F., Hensen, J.L.M. and Overend, M. (2017), "Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive façades", *Journal of Building Performance Simulation*, pp. 1-19, available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19401493.2016.1152303>.
- Nguyen, T.A. and Aiello, M. (2013), "Energy intelligent buildings based on user activity: A survey", *Energy and Buildings*, No. 56, pp. 244-257, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004537>.
- Perino, M. and Serra, V. (2015), "Switching from Static to adaptable and Dynamic Building Envelopes: A Paradigm Shift for the Energy Efficiency in Buildings", *Journal of Façade Design and Engineering*, Vol. 3, fasc. 2, pp. 143-163, available at: <https://content.iospress.com/articles/journal-of-façade-design-and-engineering/fde0039>.
- Revel, G.M., Arnesano, M. and Pietroni, F. (2014), "Development and validation of a low-cost infrared measurement system for real-time monitoring of indoor thermal comfort", *Meas. Sci. Technol.* 25 085101, available at: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/8/085101>.
- Sala, M. and Romano, R. (2011), "Building envelope innovation: smart façades for non residential buildings", *Techne Journal of Technology for Architecture and Environment*, No. 2, pp. 158-169, available at: <http://www.fupress.net/index.php/techne/article/view/9938>.
- Sinopoli, N. and Tatano, V. (2002), *Sulle tracce dell'innovazione: tra tecniche e architettura*, Franco Angeli, Milan.
- Sung, D. (2016), "A New Look at Building Façades as Infrastructure", *Engineering*, No. 2, pp. 63-68, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809916301497>.
- Velasco, R., Brakke A.P. and Chavarro, D. (2015), *Dynamic Façades and Computation: Towards an Inclusive Categorization of High Performance Kinetic Façade Systems*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, DE.