

Retrofitting energetico ed impiantistico in edifici storici: l'esempio del Palagio di Parte Guelfa in Firenze

Carla BALOCCO*, Enrico MARMONTI*

*Dipartimento di Ingegneria Industriale. Università degli Studi di Firenze

SOMMARIO

Il presente lavoro di ricerca concerne una proposta di riqualificazione impiantistica ed energetica di un edificio medievale convertito in museo, il Palazzo di “Palagio di Parte Guelfa”, a Firenze. Attraverso simulazioni in regime transitorio sono state definite le condizioni interne di microclima di tutto. In particolare è stato studiato il corpo di fabbrica del Calcio Storico Fiorentino. Il confronto dei risultati ottenuti dei parametri microclimatici con i valori suggeriti dagli standards per la tutela e la conservazione dei beni storico-artistici, ha suggerito una soluzione impiantistica non invasiva e reversibile. L'impianto proposto, un sistema di condizionamento ad aria a portata costante accoppiato ad un sistema a pannelli radianti montato a secco sopra la pavimentazione esistente, è stato simulato in condizioni transitorie durante tutto l'anno per studiare le prestazioni energetiche del sistema. Questa soluzione, che assicura le condizioni termoigrometriche per la conservazione delle opere d'arte ed il benessere degli occupanti, costituisce un esempio delle possibilità d'intervento in edifici storici convertiti in museo e localizzati in contesti climatici caratterizzati da sollecitazioni termiche e carichi solari impulsivi molto importanti.

ABSTRACT

This paper presents a performance-based design of a HVAC plant and controller system of the “Palagio di Parte Guelfa” Palace, a medieval building converted into a museum in the city of Firenze. Transient simulations to evaluate the internal microclimate conditions during the year for the building and the different system plant were carried out. A comparison between the indoor microclimatic parameters obtained and the values suggested by the standards on protection and conservation of historical works of art, suggested a non-invasive and reversible plant system solution. The Museum of Historical Football building portion is the case study. The proposed plant, a constant air flow system coupled with radiant panels dry mounted above the existing floor, was simulated throughout the year under transient conditions to evaluate its energy performance. This solution ensures indoor temperature and humidity values suitable for the conservation of works of art and visitor comfort. It is an example of a possible course of action for a plant refurbishment in a historic building converted into a museum, located in climatic regions characterized by high thermal and solar loads. The present paper concerns the study of an integrated and reversible architectural-plant solution proposed: reversibility of the proposed system is understood as the possibility for the present conditions to be easy restored and rational use of energy.

1. INTRODUZIONE

Storicamente in Italia i grandi musei sono ubicati all'interno di palazzi storici (regge, palazzi civili, residenze e ville nobiliari, complessi ecclesiastici, etc.) e pertanto soggetti alle politiche dei beni culturali che, giustamente, ne tutelano e salvaguardano l'identità e la conformazione storica. Il museo quindi trova sede in luoghi molto diversi: il 27% in case e palazzi storici, il 30% in chiese e conventi, il 20% in rocche e castelli, il 10% va riservato a scavi di tipo

archeologico-classico e parchi. Edifici progettati e realizzati per differenti scopi nei secoli precedenti, per l'importanza storica che assumono e le opere d'arte che contengono, divengono spesso sede di istituzioni museali. Questo passaggio può apportare variazioni anche importanti nella distribuzione degli ambienti per rispondere a standard ed esigenze distributive specifiche e spesso sottoporre gli ambienti a elevati flussi di visitatori. Queste

circostanze impongono una serie di condizioni alla gestione del museo di cui è necessario tener conto: dalla difficoltà e/o impossibilità di inserire ascensori, alla mancanza di spazi per gli impianti e i laboratori o servizi aggiuntivi, fino al sovraffollamento dei depositi.

Nel resto dell'Europa, e principalmente negli Stati Uniti, siamo di fronte ad una vera e propria architettura del museo in cui gli spazi espositivi vengono progettati in funzione dei diversi servizi che il museo deve offrire: da quelli espositivi, a quelli di conservazione, di rappresentanza, di studio-ricerca sperimentazione, di gestione amministrativa fino a quelli destinati specificatamente al pubblico. In tutti i casi l'edificio museo non costituisce solo un contenitore ma diviene esso stesso parte dell'esposizione. La recente letteratura scientifica mostra come, in interventi di riqualificazione energetica in edifici storici, per una corretta valutazione degli interventi necessari, non si possa prescindere dalla conoscenza della termofisica dell'edificio [1]. Ad oggi è nota l'importanza di un approccio multidisciplinare tra chi si occupa di conservazione delle opere d'arte e storia, di chimico-fisica, di ottica nonché di impianti tecnici civili [2,3].

In edifici che contengono beni storici-artistici il controllo del microclima interno è un aspetto molto importante perché incide in modo diretto sulla conservazione delle opere. I principali agenti, infatti, che causano processi di degrado sono molteplici: radiazioni elettromagnetiche (da sorgenti di luce sia naturale che artificiale), condizioni termoigrometriche e qualità dell'aria a contatto con l'oggetto. Questi fattori portano a tre possibili meccanismi di degrado: di tipo fisico (con variazione di forma e dimensione degli oggetti), di tipo chimico (con reazioni chimiche), di tipo biologico (con proliferazione di microrganismi o funghi). Occorre porre quindi una particolare attenzione al microclima interno per evitare il sopraggiungere di condizioni di rischio come la formazione di condensa su superfici fredde, con successiva proliferazione di funghi o muffe o annerimento delle superfici, o evitare sollecitazioni meccaniche ai materiali dovute a dilatazioni termiche. Molti materiali presenti all'interno di edifici storici, ma anche costituenti l'involucro edilizio interno ed esterno, rispondono sia ai cambiamenti di temperatura che di umidità relativa. Materiali organici come legno, carta, pergamena, tessuti sono tra i più vulnerabili nei confronti del loro cambiamento. Quest'ultimi sono in equilibrio, nel loro contenuto di acqua, con l'umidità dell'aria circostante: variazioni

di umidità e temperatura modificano l'umidità anche nei materiali, che si portano ad un nuovo equilibrio, provocando variazioni dimensionali che nel tempo possono compromettere l'integrità dell'opera [4,5].

La scelta di un "condizionamento conservativo" con un controllo continuo dell'umidità relativa durante tutto l'anno e capace di attenuare la velocità delle variazioni di temperatura e umidità su base stagionale può in certi casi essere una buona soluzione. Infatti sarebbe possibile un controllo delle condizioni interne con valori di temperatura tali da garantire principalmente la conservazione delle opere, e successivamente il comfort dei visitatori quando questi sono presenti. Recenti lavori di letteratura hanno mostrato differenti approcci e proposte anche in ambito sperimentale per la valutazione delle condizioni ambientali nei musei [5], e in particolare per l'inserimento di impianti in modo non invasivo [6].

In questo nostro lavoro viene analizzato il comportamento termofisico di un edificio storico, Palagio di Parte Guelfa, sede del calcio storico, dalla struttura architettonica molto complessa perché destinato ad utilizzi molto diversi tra loro, corrispondenti ad altrettante zone termiche. Sono state condotte simulazioni in regime transitorio con un software commerciale [7] e quindi simulata e valutata una proposta per una soluzione impiantistica specifica per ogni zona dell'edificio studiato che fosse poco invasiva, facilmente amovibile e manutenibile. I risultati hanno mostrato come questa soluzione impiantistica consenta di garantire i requisiti microclimatici necessari alla conservazione delle opere d'arte e contemporaneamente il comfort degli occupanti.

2. IL COMPLESSO DEL PALAGIO DI PARTE GUELFA

2.1. Cenni storici

Il complesso del Palagio originariamente era composto da tre differenti edifici, ognuno indipendente e con differente funzione, successivamente uniti come attualmente visibile a partire dal 16° secolo. Un primo nucleo era costituito dal "Palagio di Parte Guelfa", nella porzione NE dell'edificio attuale, sede della rappresentanza dell'Oligarchia durante il periodo della Repubblica, centro dell'autorità giudiziaria con un forte controllo sulla vita politica a Firenze fino alla salita al potere della famiglia Medici. Tra il 1345 e 1377 gli edifici diversi, come la chiesa San Biagio, i laboratori dell'Arte della Seta e gli edifici limitrofi sono stati riuniti e collegati tra loro per ampliare l'edificio giudiziario. Un secondo intervento nei primi

anni del 15° secolo: nel 1430 per la parte guelfa vennero intrapresi lavori di ampliamento, alla cui direzione prese parte anche il Brunelleschi prima del 1434. Questo anno segna la dominazione medicea, che porta al declino della magistratura della parte guelfa, non abolita ma fortemente limitata. Con un'interruzione tra il 1438 ed il 1442, i lavori vennero terminati con l'unione dei diversi edifici e la realizzazione della grande sala Brunelleschi. Nel 16° secolo Firenze diviene la capitale del Granducato di Toscana, con vari interventi urbanistici e architettonici. Dopo l'alluvione del 1557, Giorgio Vasari interviene nuovamente sul "Palagio di Parte Guelfa" adattando il complesso a ricevere il "Monte Comune", un banco dei pegni storico, e diversi uffici. Nel 1770 seguì un ulteriore adattamento. Il risultato finale è una completa distorsione della distribuzione degli ambienti interni e degli spazi funzionali, per cui l'edificio perde l'originale configurazione. Una prima serie di interventi nel 1800 mira a recuperare le caratteristiche originali del complesso edilizio, collegando la chiesa di San Biagio alla porzione dell'Arte della Seta, creando le condizioni per la realizzazione della Biblioteca di Palazzo. Nel 1921 un restauro quasi completo corregge le modifiche precedenti e demolisce gli elementi costruttivi aggiunti nel 16° e 18° secolo riportando la Sala Brunelleschi e le altre sale storiche alle loro dimensioni originali. Dopo la seconda guerra mondiale il complesso riceve lavori di restauro per i danni dovuti ai bombardamenti aerei.

2.2. Il sistema edilizio

Il complesso edilizio studiato è composto da tre piani fuori terra ed è caratterizzato nelle sue differenti porzioni da differenti destinazioni d'uso. In particolare nella porzione nord-ovest dell'edificio è presente la Biblioteca, con un grande locale in unico volume e annessi locali di servizio. Uffici del Comune di Firenze sono situati nel piano terreno nella porzione nord-est fino al secondo piano, mentre nella rimanente porzione di piano terreno si trovano i locali della polizia municipale, le scale ed i locali tecnici.

Al primo piano (Fig.1) nella porzione sud sono invece presenti i locali del Calcio Storico Fiorentino (Sala dei Capitani, Sala degli Arazzi, Sala del Brunelleschi e del Camino caratterizzate da un doppio volume), la Biblioteca nella porzione nord-ovest e nella rimanente parte locali con destinazione ad ufficio pubblico. Infine al piano secondo e terzo piano sono ancora contenuti ambienti destinati all'ufficio e porzioni degli

ambienti del Calcio Storico.

Le caratteristiche architettoniche e dimensionali degli ambienti sono riportate in Tabella 1.

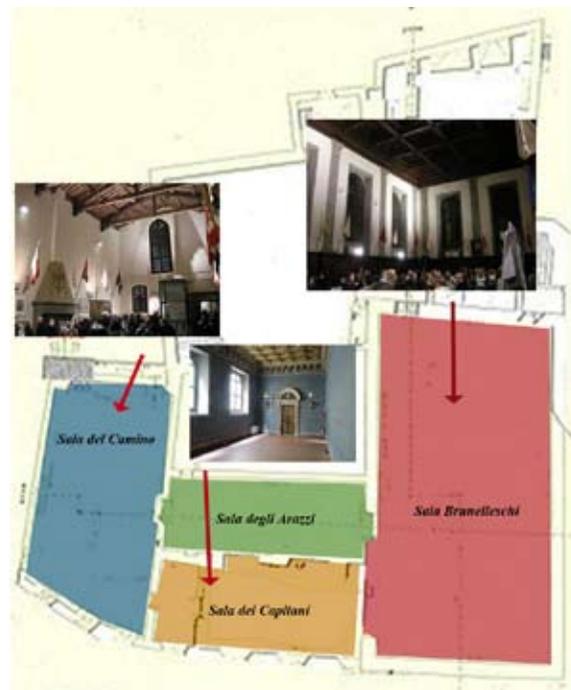


Figura 1: Distribuzione degli ambienti analizzati del Calcio Storico Fiorentino

Tabella 1: Caratteristiche geometriche e dimensionali delle zone

Zone Termiche	Superficie in pianta [m ²]	volume [m ³]
Biblioteca	619	5580
Polizia Municipale	612	2465
Uffici 1° piano	66	377
Uffici 2° piano	660	3378
Sala Brunelleschi	622	3112
Sala Capitani	69	390
Sala Drappi	80	453
Sala Camino	135	863

L'edificio è composto da differenti soluzioni costruttive dovute ai molteplici interventi che si sono succeduti nel corso della storia. Tabella 2 mostra le caratteristiche termo fisiche dei principali componenti edilizi.

Tabella 2: caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi

	Stratigrafia	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Densità [Kg/m ³]	Calore Specifico [J/kgK]	spessore complessivo [m]	U value [W/m ² K ⁻¹]	Costante di Tempo [h]
Muratura in pietra 0.7m	Intonaco interno	0.02	0.5	1300	1000	0.7	2.95	10.1
	Pietra	0.65	7.3	2500	800			
	Intonaco esterno	0.02	0.5	1300	1000			
Muratura in pietra 0.95m	Intonaco interno	0.02	0.5	1300	1000	0.95	2.68	15.5
	Pietra	0.9	7.3	2500	800			
	Intonaco esterno	0.02	0.5	1300	1000			
Muratura interna	Intonaco interno	0.01	0.5	1300	1000	0.1	2.22	1
	Mattone forato	0.08	0.4	700	100			
	Intonaco esterno	0.01	0.5	1300	1000			
Volta a crociera	Pavimento Terracotta	0.08	0.47	1600	800	0.59	0.80	>24
	Massetto	0.03	0.18	1800	800			
	Riempimento	0.4	0.7	1500	1000			
	Mattone pieno	0.08	0.47	1600	800			
Solaio contro terra	Pavimento in Mattone	0.08	0.47	1600	800	0.51	0.93	20.5
	Massetto	0.03	0.18	1800	800			
	Pavimento in Mattone	0.08	0.47	1600	800			
Solaio interpiano	Pavimento in Mattone	0.08	0.47	1600	800	0.16	1.65	2
	Massetto	0.03	0.18	1800	800			
	Legno	0.05	0.5	500	1000			
Copertura	Legno	0.05	0.5	500	1000	0.13	2.05	0.72
	Solaio in cls	0.03	0.18	1800	800			
	Copertura in laterizio	0.05	1	200	800			

Le componenti finestrate attualmente presenti sono composte da vetri singoli con infissi in legno. Al piano terreno sono presenti inoltre grate in ferro che funzionano da schermi alla radiazione solare;

mentre sulla copertura al secondo piano, nella zona della Biblioteca, è presente un grande lucernario privo di sistemi schermanti. Le caratteristiche delle componenti vetrate sono riassunte in Tabella 3.

Tabella 3: Caratteristiche termo fisiche dei componenti vetrati

	spessore [m]	fattore solare	assorbimento solare esterno		assorbimento solare interno		trasparenza	Emissività		U [W/m ² K]
			Sup. est.	Sup. int.	Sup. est.	Sup. int.		Sup. est.	Sup. int.	
vetro singolo	0.02	0.88	0.02	0.02	0.02	0.02	0.91	0.1	0.1	5.935

3. ANALISI TERMICA E MICROCLIMA INTERNO

3.1 Il modello solido.

Partendo dalle caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio è stato realizzato un modello

solido del complesso (Fig.2) tenendo conto delle caratteristiche architettoniche e dimensionali delle singole zone termiche. L'edificio è stato studiato in funzione della sua localizzazione geografica (la latitudine 43.77°N , longitudine 11.253° E, quota dal

livello del mare 50 m, UTC +1:00) e del contesto urbano circostante. Sono stati modellati anche gli edifici circostanti per tener conto delle ombre portate e dei relativi aggetti.

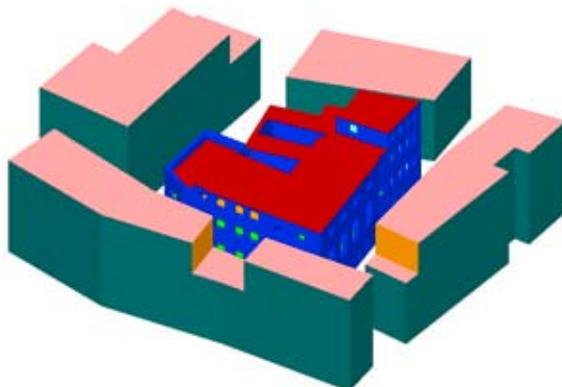


Figura 2: Edificio analizzato e contesto urbano in cui è inserito

Per tutto l'anno sono state condotte simulazioni in regime transitorio utilizzando [7] e quindi facendo riferimento ai dati climatici CTI [10] per la città

di Firenze. Una prima analisi, per l'intero anno, in regime transitorio dell'edificio privo di impianti di climatizzazione. In seguito è stata analizzata la risposta transitoria del sistema edificio-impianto durante l'anno in particolare per i giorni più freddo (5 gennaio) e più caldo (31 luglio) rappresentativi delle condizioni peggiori e cautelative delle stagioni invernale ed estiva.

Partendo dalle differenti destinazioni d'uso e dalle corrispondenti presenti componenti impiantistiche, l'intero edificio è stato suddiviso in zone termiche. Ad ogni zona termica è stato poi associato un profilo di utilizzo, tenendo conto degli orari in cui gli ambienti sono aperti al pubblico (per la Biblioteca, Uffici e locali del Calcio Storico dal lunedì al venerdì dalle ore 9:00 alle ore 18:00) e quando invece sono chiusi (sabato e weekend), secondo la Tabella 4. Si è fatto riferimento per i valori di ventilazione degli ambienti a [11], per i valori dei carichi sensibili e latenti delle persone a [12] per componenti tecnologiche e lampade presenti in ambiente a [13].

Tabella 4 Profili di utilizzo per singole zone termiche

	Biblioteca	Polizia Municipale	Uffici 1° piano	Uffici 2° piano	Uffici 3° piano	Sala Brunelleschi	Sala Capitani	Sala Drappi	Sala Camino
Superficie [m ²]	513	716	66	660	160	622	69	80	135
Occupazione UNI 10339 [pers]	-	43	4	40	10	37	4	5	8
Occupazione fornita [pers]	54	27	9	9	9	-	-	-	-
Ventilazione [*10 ⁻³ m ³ /s pers]	6	11	11	11	11	-	-	-	-
Ventilazione [*10 ⁻³ m ³ /m ² s]	-	-	-	-	-	1.5	1.5	1.5	1.5
Ricambi Aria [L/s]	324	297	99	99	99	933	104	120	203
Apporti da Illuminazione [W/m ²]	15	15	15	15	15	20	20	20	20
Calore sensibile Occupazione [W/m ²]	8	3	11	1	5	5	5	5	5
Calore latente Occupazione [W/m ²]	3	1	4	0	1	1.6	1.6	1.6	1.6
Calore sensibile apparati tecn. [W/m ²]	5.4	10.8	5.4	5.4	5.4	-	-	-	-
Calore latente apparati tecn.[W/m ²]	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2 L'impianto esistente

Il riscaldamento invernale è assicurato da una caldaia di 245 kW, situata al piano terreno, a servizio degli ambienti del piano terreno, primo e secondo, con due differenti reti di distribuzione del fluido termovettore: uno ad alta temperatura per i radiatori ed uno a bassa temperatura per fancoil e splitter a parete, per le tipologie di terminali presenti nelle diverse zone termiche (uffici, biblioteca, ambienti polizia municipale). Nei locali del Calcio Storico (Sala Brunelleschi, Sala dei Capitani, Sala degli Arazzi, Sala del Camino), oggetto del presente studio, sono presenti solo elementi fancoil.

Il raffrescamento estivo è assicurato da un gruppo frigo posto nel cortile interno del palazzo, di 36.6 kW che fornisce acqua refrigerata (temperatura 7-12°C) ai fancoils degli ambienti.

A servizio degli uffici al terzo piano è invece presente un sistema a pompa di calore per il condizionamento estivo ed invernale.

La normativa italiana [9] impone per la zona climatica D, un periodo di funzionamento dell'impianto di riscaldamento dal 1 novembre al 15 aprile, con tempi di accensione fino a 12 ore. L'impianto è quindi funzionante durante la settimana lavorativa dalle ore 7:00 e fino alle 19:00 e resta spento il

sabato e la domenica.

I componenti impiantistici sono simulati predisponendo due differenti profili di utilizzo, uno in condizioni di apertura al pubblico con apporti interni e impianto operativo ed uno “non-condizionato” senza apporti interni né radiazione solare e con infiltrazione d’aria esterna.

3.3. Impianto esistente: Risultati e Discussione

Le simulazioni transitorie del sistema condotte

sia considerando l’edificio privo di impianto che dotato dell’impianto esistente attuale, hanno permesso di valutare il comportamento termofisico e la rispondenza dei valori di temperatura e umidità relativa dell’aria interna ai valori limite raccomandati per la conservazione delle opere d’arte, forniti dalla normativa italiana (Ministero per i Beni e le Attività Culturali Mi.BAC) [15], quella europea [16,14] e dagli standard americani. [17]. In Tabella 5 sono riportati i valori limite ed i “campi di accettabilità” raccomandati dalle diverse normative.

Tabella 5: Valori suggeriti per la conservazione delle opere d’arte

	Opere in legno				Tessuti ed Arazzi				
	θ_0 [°C]	$\Delta\theta_{max}$ [°C]	u_0 [%]	Δu_{max} [%]	θ_0 [°C]	$\Delta\theta_{max}$ [°C]	u_0 [%]	Δu_{max} [%]	
Mi.BAC	19-24	±1.5	50-60	-	-	-	40-60	-	
UNI 10829:1999	19-24	±1.5	50-60	±4	19-24	±1.5	30-50	±6	
ASHRAE	B class protection	15-25	±5	50	±10	15-25	±5	50	±10
	C class protection	15-25	<30	25-75	-	15-25	<30	25-75	-

In assenza di sistemi di condizionamento, i valori di temperatura per tutte le zone termiche sono risultati compresi tra 6°C e 36°C. A titolo di esempio sono mostrati i valori delle cumulate di frequenza dell’indice di scostamento, calcolato secondo [18], per la temperatura (Fig.3) e l’umidità relativa (Fig.4), nella Sala del Camino.

Confrontando queste figure è possibile notare come i valori annuali, in assenza di condizionamento, sono molto diversi sia per quanto concerne la temperatura che l’umidità relativa; presentano frequenze elevate per i valori più bassi. L’indice di scostamento dai valori consigliati è pari al 87% per la temperatura e 73% per l’umidità relativa.



Figura 3 Distribuzione annuale della temperatura - Sala del Camino



Figura 4 Distribuzione annuale dell’umidità relativa - Sala del Camino

Ulteriori simulazioni sono state effettuate valutando l’impianto esistente in funzione, con carichi latenti e sensibili dovuti alla presenza di visitatori. In particolare, l’impianto è stato considerato funzionante dalle ore 7:00 alle ore 19:00 nella stagione invernale, e dalle 8:00 alle 18:00 nella stagione estiva. All’interno di questi orari il sistema impiantistico

controlla i valori di temperatura dell’aria interna, mentre nelle rimanenti ore di non funzionamento, soprattutto nei fine settimana quando una parte dell’edificio è chiuso, esso non fornisce alcun tipo di controllo (Fig.5). In queste condizioni si riscontrano valori dell’indice di deviazione pari al 43% per la temperatura e 66% per l’umidità relativa.

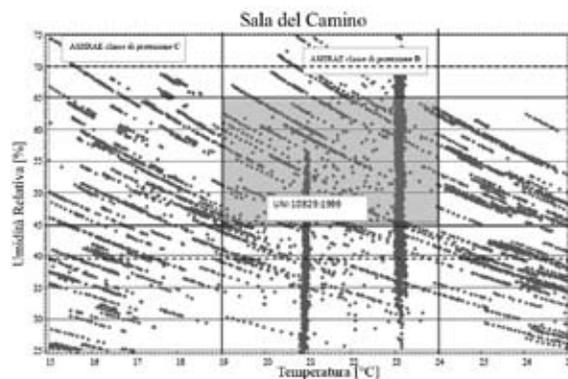


Figura 5 Impianto esistente in funzione: Distribuzione dei valori di temperatura ed umidità relativa nella Sala del Camino e campi di accettabilità.

Prima di proporre una nuova soluzione impiantistica, è stata valutata una prima ipotesi di mantenimento dell'esistente impianto con la sola modifica del sistema di regolazione, in modo che sia durante il giorno che durante il fine settimana l'impianto sia funzionante per l'intero arco delle 24 ore. I risultati ottenuti dalle simulazioni transienti, mostrano come i valori di temperatura dell'aria restino all'interno del campo di accettabilità, con un indice di scostamento del 3%. Tuttavia questa modifica dell'impianto esistente non consente ancora un corretto controllo dell'umidità relativa. La Fig.6 mostra un addensamento dei valori di temperatura intorno nell'intervallo 19-24 °C, ma una persistente dispersione dei valori di umidità relativa con scostamenti del 64%.

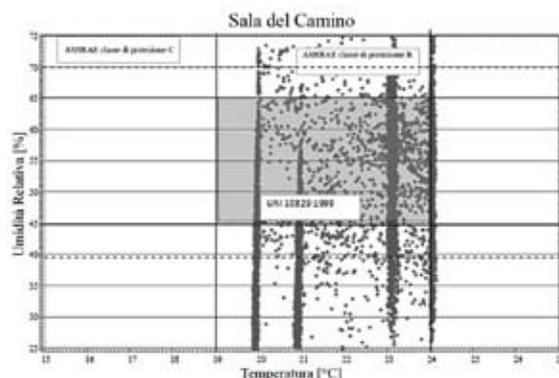


Figura 6 Impianto esistente funzionante 24h: temperatura ed umidità relativa e campi di accettabilità.

4. IL SISTEMA IMPIANTISTICO PROPOSTO.

Le attuali soluzioni tecniche per sistemi impiantistici pensati all'interno di edifici storici [4,18] hanno suggerito un intervento di riqualificazione impiantistica tale da assicurare un controllo non solo sulla temperatura interna ma anche sull'umidità relativa (attualmente non possibile) e rispondere ai suggerimenti e agli standards per la con-

servazione delle opere d'arte [14] e [15], riportati peraltro in Tabella 5.

Le Soprintendenze non permettono modifiche dei componenti edilizi opachi e trasparenti, al fine di migliorarne le prestazioni energetiche, come nemmeno modifiche architettoniche o strutturali del tetto dell'edificio nelle sue parti o del pavimento. La soluzione impiantistica proposta costituisce uno dei possibili interventi, una soluzione non invasiva e completamente rimovibile, di facile manutenzione, utilizzando comunque l'attuale centrale termica. L'impianto esistente a ventilconvettori è sostituito con un impianto ad aria a portata costante (CAV) accoppiato ad un sistema a secco a pannelli radianti. Ciò implica l'inserimento di piccole e compatte Unità di Trattamento Aria (UTA): per la Sala Brunelleschi le UTA vengono collocate nello spazio delle scale, nella Sala del Camino appena al di sopra della porta principale, adiacente l'ambiente esterno, con espulsione dell'aria attraverso condotti passanti all'interno del camino. Per le due Sale degli Arazzi e dei Capitani, una UTA si trova sul tetto dell'edificio e utilizza la canna fumaria come cavedio per la distribuzione dell'aria. In Fig.7 è possibile vedere i condotti di distribuzione dell'aria all'interno di ogni sala e la posizione delle diverse UTA.

Il sistema CAV bilancia i carichi latenti nelle Sale e garantisce una ventilazione meccanica con portate di aria di rinnovo corrispondenti a quelle riportate in Tabella 5 e suggerite in [11]. Il sistema a pannelli radianti (dal ridotto spessore di 2,5 cm) montato sopra il pavimento esistente, garantisce il riscaldamento e il raffrescamento sensibile.

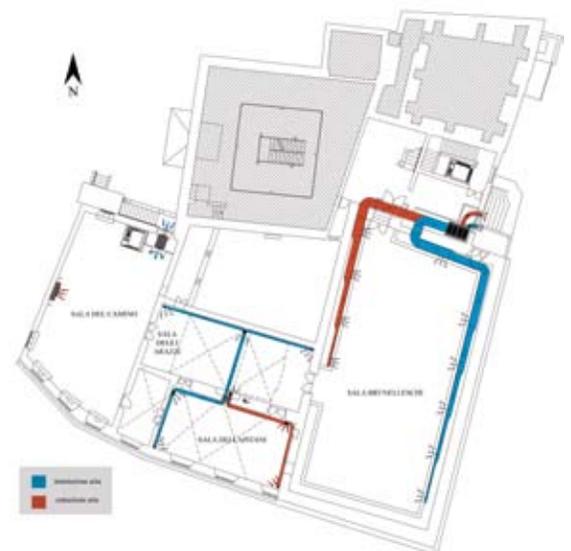


Figura 7. Soluzione impiantistica proposta: canali di distribuzione dell'aria e posizionamento delle UTA

L'impianto proposto è stato simulato con [7] durante tutto l'anno in condizioni transitorie. I risultati ottenuti mostrano che i valori di temperatura e di umidità dell'aria sono adatti alla conservazione delle opere d'arte e ad un buon grado di accettabilità degli ambienti da parte degli occupanti e dei visitatori. Si tratta di un esempio di retrofit energetico di un impianto esistente in un edificio storico trasformato in un museo, peraltro in una località climatica caratterizzata da temperature e

tassi di umidità nonché di irraggiamento solare specie in estate. In Fig.8 è mostrato lo schema dell'integrazione, del sistema a pannelli radianti con il sistema ad aria CAV. Un doppio sistema di recupero di calore, fornito da recuperatori di calore a flussi incrociati, con efficienza del 70% [19] sul circuito ad aria, consente una riduzione del consumo energetico per il trattamento come generalmente suggerito in queste situazioni [20].

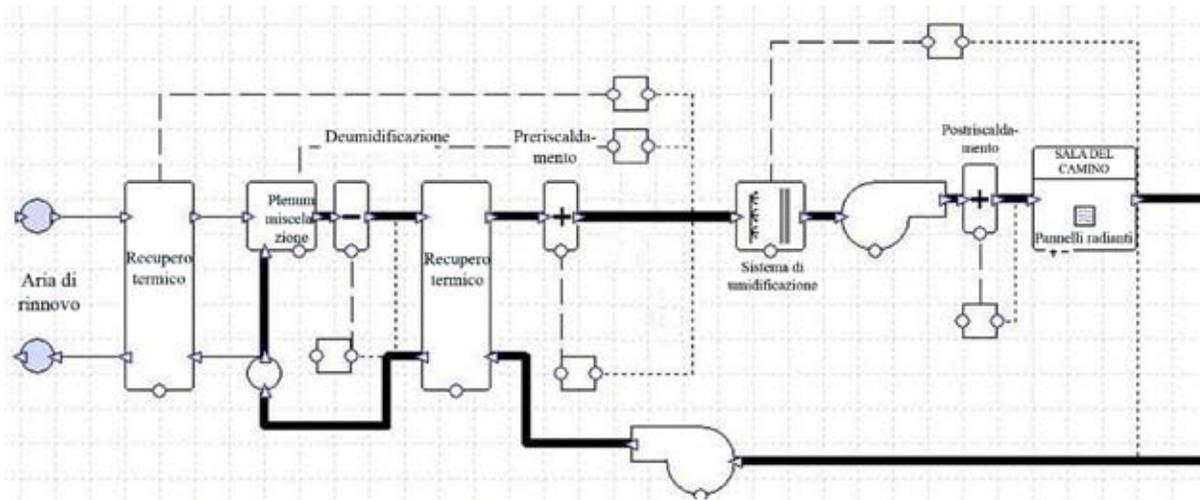


Figura 8 Schema del sistema impiantistico proposto - CAV e sistema a pannelli radianti.

Durante l'orario di apertura del museo, il sistema CAV fornisce per ogni Sala una portata costante di aria seguendo i valori riportati nella Tabella 6, mentre un plenum di miscelazione permette il ricircolo dell'aria durante le ore rimanenti. La batteria di raffreddamento del sistema CAV consente la deumidificazione dell'aria, con controllo sul titolo nel campo di 0.001 ± 0.0005 gv/kgaria secca. Dopo il sistema di deumidificazione dell'aria, è prevista una batteria di pre-riscaldamento per mantenere la temperatura dell'aria di miscela, ottenuta tra quella esterna e quella di ricircolo a 17 ± 1 °C. Una batteria di post-riscaldamento man-

tiene quindi il valore della temperatura dell'aria di immissione a 22 ± 1 °C. Nella stagione invernale un sistema di umidificazione, con controllo sul canale di estrazione dell'aria, garantisce l'umidità relativa in ambiente su valori del 50-60% mentre i pannelli radianti contribuiscono a mantenere la temperatura dell'aria interna a 20 ± 1 °C durante le ore di apertura e a 19 ± 1 °C nelle restanti ore. Nella stagione estiva i pannelli radianti garantiscono la temperatura dell'aria interna nell'intorno dei 24 ± 1 °C durante le ore di apertura e a 25 ± 1 °C nelle ore rimanenti.

Tabella 6. Portate d'aria orarie per le Sale.

	Portate d'aria di progetto [l/s]		
	Impianto esistente 9-18	Impianto esistente 24h	Impianto proposto
Brunelleschi	16000	16000	150
Arazzi	1100	1100	700
Capitani	1250	1250	650
Camino	2400	2400	700

La Tabella 6 mostra un confronto tra i diversi valori di portata d'aria per le soluzioni impiantistiche proposte. La portata di progetto dell'impianto a ventilconvettori, prima per funzionamento par-

ziale dalle ore 9 alle 18 e successivamente continuo sulle 24 ore, è stato calcolata utilizzando una differenza di temperatura sullo scambiatore di 10 °C per riscaldamento e 5 °C per il raffrescamento

estivo. Il sistema CAV fornisce una portata di aria notevolmente inferiore rispetto alle altre soluzioni e sufficiente a controllare il carico latente nelle diverse Sale. Il restante carico sensibile è fornito dal sistema a pannelli radianti. In particolare in ambienti come la Sala Brunelleschi, caratterizzata da ampi volumi ma con una superficie in pianta ridotta (dove i carichi termici dovuti al sistema di illuminazione e dagli occupanti/visitatori sono assegnati in termini di W/m²) si riscontrano basse portate d'aria, necessarie a compensare i minori carichi latenti. In questi ambienti il sistema a pannelli radianti ha buona efficienza e prestazioni ottime per compensare i rimanenti carichi sensibili, risultanti dal bilancio termico della sala in estate e inverno.

Il sistema impiantistico proposto garantisce valori di temperatura dell'aria e umidità relativa all'interno dei corrispondenti campi di accettabilità [14-16], con una deviazione pari allo 0%. In Fig.9 sono forniti i risultati ottenuti per la Sala del Camino a titolo esemplificativo.

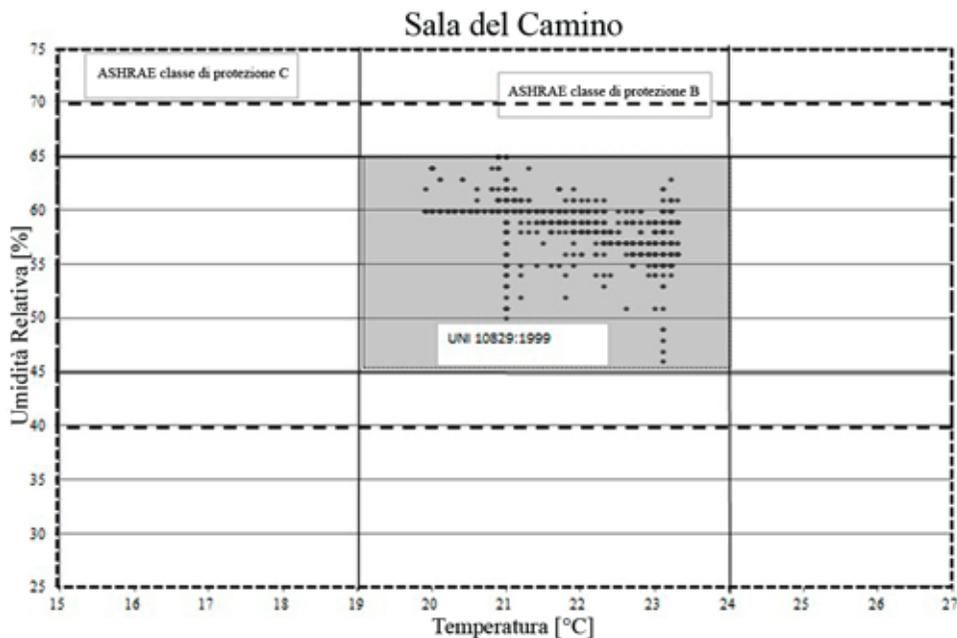


Figura 9 Soluzione impiantistica proposta: temperatura ed umidità relativa e campi di accettabilità.

Le Tabelle 8 e 9 mostrano i carichi termici ottenuti nel giorno più freddo dell'anno (5 gennaio) e per il giorno più caldo (16 luglio) ed evidenziano inoltre, come i carichi termici richiesti per un controllo della temperatura e dell'umidità relativa in tutte le sale siano di poco più elevati rispetto a quelli richiesti dall'esistente impianto a ventilconvettori, nelle due condizioni di funzionamento.

Tabella 7. Potenza di riscaldamento giornaliera per il 5 gennaio delle diverse soluzioni impiantistiche.

	5 Gennaio Potenza riscaldamento [kW]			
	Impianto esistente	Fancoil 24 h	Impianto proposto	
			CAV	Pannelli radianti
Brunelleschi	417	539	236	624
Arazzi	65	114	207	67
Capitani	48	141	192	52
Camino	145	416	204	206

Tabella 8. Potenza di raffrescamento giornaliera per il 16 luglio delle diverse soluzioni impiantistiche.

	16 luglio Potenza di raffrescamento [kW]			
	Impianto esistente	Fancoil 24 h	Impianto proposto	
			CAV	Pannelli radianti
Brunelleschi	804	810	104	978
Arazzi	114	91	206	39
Capitani	45	120	194	103
Camino	212	267	206	121

La potenza termica oraria di riscaldamento e di raffreddamento per il sistema impiantistico proposto è più elevata in valore, ma comunque confrontabile, rispetto alle altre soluzioni (Tabelle 7,8). Questi valori più elevati sono dovuti al trattamento dell'aria di ventilazione. In particolare, per la Sala degli Arazzi, dove è necessaria una maggiore ventilazione e trattamento dell'aria rispetto alle altre sale, l'energia termica richiesta dal sistema CAV è maggiore, mentre la potenza richiesta dai pannelli radianti è inferiore. Al contrario, per la Sala Brunelleschi è richiesta una potenza maggiore dai pannelli radianti, perché le portate di aria di ventilazione e il connesso trattamento sono minori. In particolare poi, la soluzione impiantistica proposta presenta minori potenze orarie per la stagione di riscaldamento e raffreddamento e anche per i giorni più caldi e più freddi. A titolo di esempio, le Figure 10 e 11 forniscono i risultati ottenuti per la Sala del Camino.

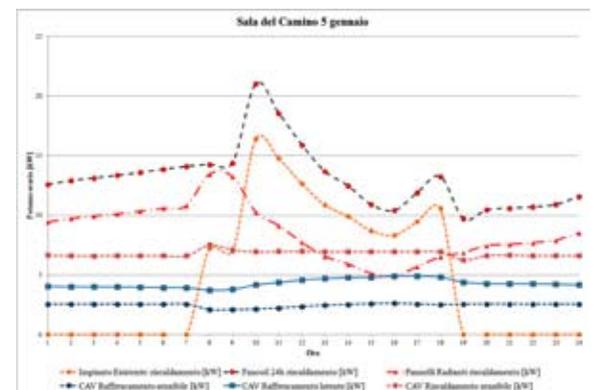


Figura 10 Sala del Camino: potenze orarie di riscaldamento per le diverse soluzioni impiantistiche

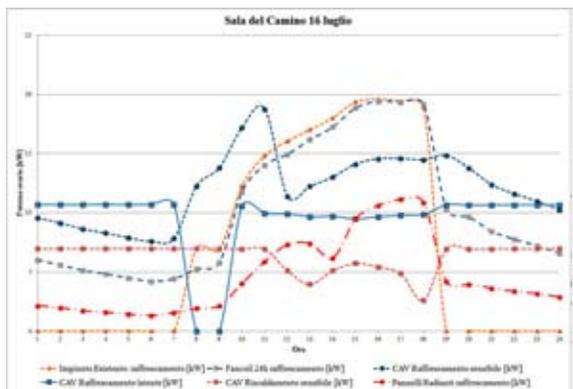


Figura 11 Sala del Camino: potenze orarie di raffrescamento per le diverse soluzioni impiantistiche

Le potenze orarie necessarie al trattamento dell'aria (raffreddamento con deumidificazione e post-riscaldamento) non superano rispettivamente i 5 kW e 7 kW.

Lo stesso andamento orario delle potenze di condizionamento dovute alla soluzione impiantistica proposta è riscontrabile durante il giorno più caldo, 16 luglio (Fig.11); sia durante la stagione invernale che nella stagione estiva la deumidificazione dell'aria è necessaria per un numero elevato di giorni. Questo può essere osservato sia nel giorno più freddo (Fig.10) che nel giorno più caldo (Fig.11), con particolare attenzione all'andamento della voce "CAV Potenza latente di raffrescamento".

Nelle stagioni estiva e invernale, le comportamenti dell'impianto è molto simile sia per Sala del Camino che per la Sala Brunelleschi, ma non estendibile alle altre sale. Nella Sala degli Arazzi e dei Capitani il controllo del microclima interno richiede portate di aria più elevate (Tabella 6). Per queste sale la portata aria necessaria per la ventilazione è maggiore (Tabella 6), a causa della maggiore superficie in pianta rispetto al volume e conseguentemente carichi termici endogeni maggiori, rispetto a quelli delle Sale Brunelleschi e del Camino, dotate come precedentemente detto di un doppio volume (Tabella 2). Le Fig.12 e 13 mostrano, per la Sala degli Arazzi, il confronto tra le potenze termiche richieste dall'impianto esistente a ventilconvettori sia nella condizione di operatività dalle 7:00 alle 19:00 che nella condizione di 24 ore di funzionamento, rispetto a quella richiesta dalla soluzione impiantistica proposta. I valori mostrano come le portate d'aria, richieste per la Sala degli Arazzi siano maggiori, con più elevati consumi per il raffrescamento e deumidificazione dell'aria, sia nelle stagioni invernali ed estive. Di conseguenza, la potenza richiesta dal

sistema a pannelli radianti è ridotta ed limitata solo alla stagione invernale. Nella stagione estiva invece il sistema CAV è sufficiente a controllare le condizioni microclimatiche interne (Fig.13).

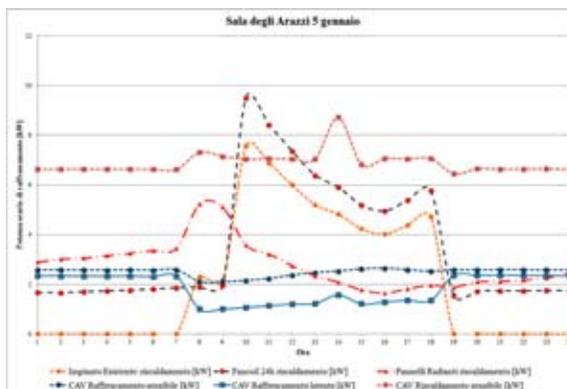


Figura 12 Sala dei Arazzi: potenze orarie di riscaldamento per le diverse soluzioni impiantistiche

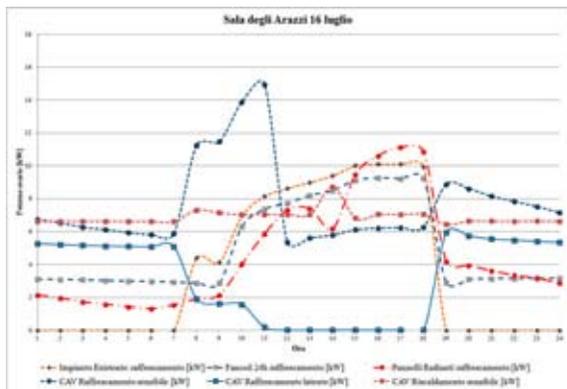


Figura 13 Sala dei Arazzi: potenze orarie di raffrescamento per le diverse soluzioni impiantistiche

Inoltre, le simulazioni in regime transitorio effettuate per tutto l'anno e per tutte le zone termiche, hanno consentito la valutazione del consumo annuo di energia. La Tabella 9 mostra il confronto tra i risultati ottenuti del consumo energetico annuale, per tutte le sale, delle diverse soluzioni impiantistiche. Il consumo annuo di energia, è particolarmente influenzato dalla potenza richiesta dal sistema impiantistico per il raffrescamento ed il post-riscaldamento, dovuti ovviamente al trattamento dell'aria. Per la maggior parte dell'anno l'aria fornita alle sale deve essere deumidificata e la Tabella 9 mostra come l'energia termica per la deumidificazione sia molto elevata. Questo comporta un consumo totale di energia per il raffreddamento e trattamento dell'aria, quasi doppio rispetto a quello richiesto all'impianto esistente a ventilconvettori e funzionante 24 ore.

Tabella 9. Consumi energetici annuali

	Consumi energetici annuali										
	Impianto esistente		fancoil 24 h			Impianto proposto					
	Riscalda- mento [kWh year]	Raffresca- mento [kWh year]	Riscalda- mento [kWh year]	Raffresceme- nto [kWh year]	CAV risc. [MW]	CAV raffr. [kWh year]	Pannelli risc. [kWh year]	Pannelli raffresc.[kWh year]	Deumidif- icazione [kWh year]	CAV Totale risc. [kWh year]	CAV Totale raffresc.. [kWh year]
Brunelleschi	27430	51019	55166	96143	73203	42527	77333	83348	40846	114048	83372
Arazzi	4374	7203	8568	14001	60734	31333	6645	0	30600	91334	61933
Capitani	3377	6172	10403	12116	56816	27745	5360	7479	28249	85065	55993
Camino	9963	12084	35084	23034	60598	29600	22040	13043	29129	89726	58728

5. CONCLUSIONI.

La riqualificazione energetica di edifici storici è una questione assai complessa, specie se questi sono poi trasformati in musei, con la conseguente mancanza di spazio per la sistemazione degli impianti (di climatizzazione ma anche elettrici) e le difficoltà di integrazione con le strutture architettoniche. Qualsiasi proposta di riqualificazione impiantistica e di refurbishment energetico di un sistema edificio-impianto dovrebbe partire dallo studio del peso di tutti quei fattori che nel tempo hanno portato il sistema all'equilibrio termico, fisico e termodinamico con il contorno. La soluzione progettuale di impianto proposta per gli ambienti studiati si basa sul concetto di minimo impatto e reversibilità. Garantisce infatti le condizioni di tutela e conservazione non solo per le opere d'arte, ma anche per l'intero edificio del Palagio, un'opera d'arte e museo allo stesso tempo, nonché condizioni di accettabilità degli ambienti da parte degli occupanti. La sostenibilità dell'impianto proposto deve essere intesa in termini di reversibilità (minore impatto sulla struttura e principali soluzioni impiantistiche rimovibili) e sostenibilità energetica, ovvero utilizzo razionale dell'energia per garantire (con il minor consumo possibile) i requisiti sopra indicati. Questo caso studio può essere quindi considerato come un esempio di ristrutturazione e riqualificazione energetica di un edificio storico convertito in museo, dove un sistema impiantistico rimovibile e di facile manutenzione costituisce un esempio progettuale di sostenibilità energetica.

6. RINGRAZIAMENTI.

Gli autori ringraziano tutto il personale degli uffici tecnici del Comune di Firenze per i dati forniti e le informazioni, fondamentali per questa ricerca.

RIFERIMENTI

- [1] A.M. Papadopoulos, A. Avgelis, M. Santamouris, Energy study of a medieval tower, restored as a museum, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 9, October 2003, Pages 951-961.
- [2] Historical building as museums: building and artworks preservation; plans for existing system restoration and integration, International conference, Milano 1-2 April 2010.
- [3] AICARR Atti del Convegno internazionale "Tecnologie impiantistiche per i Musei" (Roma, 6 maggio 2005).
- [4] D. del Curto, Indoor environment and preservation. Nardini Editore, Kermes quaderni, Firenze, 2011.
- [5] A.W.M. van Schijndel, H.L. Schellen, J.L. Wijnfelaars, K. van Zundert, Application of an integrated indoor climate, HVAC and showcase model for the indoor climate performance of a museum, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 4, 2008, Pages 647-653.
- [6] C. Balocco, G. Grazzini, Plant refurbishment in historical buildings turned into museum, Energy and Buildings, Volume 39, Issue 6, June 2007, Pages 693-701.
- [7] Bentley software, TAS Building Simulator, 9.2.1.3 version
- [8] ISO 6946:2007 Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method.
- [9] D.P.R. n. 412, 1993. "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della L. 9 gennaio 1991, n. 10".
- [10] CTI, Anno meteorologico caratteristico per la regione Toscana secondo norma UNI-EN ISO 15927-4:2005.
- [11] UNI 10339:1995 Impianti aerulici al fini di

benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.

[12] UNI 8896, 2005. "Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione del metabolismo energetico".

[13] N. Rossi, Manuale del Termotecnico, 3° edizione, Milano, Hoepli, 2010.

[14] UNI 10969:2002, Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni.

[15] D.M. 10-05-2001 Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, Italian Standard.

[16] UNI 10829:1999, Beni di interesse storico artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi.

[17] ASHRAE Handbook: HVAC Applications, Chapter 21, "Museums, Galleries, Archives, and Libraries", 2003.

[18] D. Camuffo, E. Pagan, H. Schellen, D. Limpens-Neilen, R. Kozłowski, L. Bratasz, S. Risänen, R. Van Grieken, Z. Spolnik, L. Bencs, J. Zajackowska-Kloda, P. Kloda, M. Kozarzewski, G. Santi, K. Chmielewski, T. Jütte, A. Haugen, T.

Olstad, D. Mohanu, B. Skingley, C. Sáiz-Jiménez, C. J. Bergsten, S. Don Russo, C. Bon Valsassina, G. Accardo, C. Cacace, E. Giani, A. Giovagnoli, M. P. Nugari, A. M. Pandolci, R. Rinaldi, C. Acidini, C. Danti, A. Aldrovandi, R. Boddi, V. Fassina, L. Dal Prà, F. Raffaelli, R. Bertoncetto, P. Romagnoni, M. Camuffo and A. Troi, "Church Heating and the Preservation of Cultural Heritage", Mondadori Electa, Milano, Italy, 2007.

[19] ASHRAE, ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment (SI), Chapter 25.5: Air-To-Air Energy Recovery, American Society of Heating, Refrigerating Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2008.

[20] M. Vio, "Impianti energeticamente positivi", ALCARR Journal n.7, Anno 2, Aprile 2011, pagg 22-31.

Carla BALOCCO: Ricamatore in Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze

Enrico MARMONTI: Ingegnere Edile Magistrale, Dottorando di ricerca al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze occupandosi di facciate ventilate attive in doppia pelle di vetro.