



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi numerica e sperimentale di vetri termocromici per applicazioni in edifici ad uso ufficio

M. Zinzi, G. Rossi, P. Iacomussi, V. Serra, L. Giovannini

## ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE DI VETRI TERMOCROMICI PER APPLICAZIONI IN EDIFICI AD USO UFFICIO

M. Zinzi (ENEA), G. Rossi (INRIM), P. Iacomussi (INRIM), V. Serra (Politecnico di Torino), L. Giovannini (Politecnico di Torino)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.1 Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: A. Soluzioni innovative per l'efficientamento degli edifici

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

ENEA ringrazia i ricercatori del Politecnico di Torino e l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, per aver accettato di contribuire volontariamente a questa attività di ricerca dall'elevato contenuto tecnico e scientifico.

Il Gruppo di Ricerca del Politecnico di Torino ringrazia Fabio Favoino (Eckersley O'Callaghan Ltd.) per il suo contributo nello sviluppo del modello di simulazione numerica, Lorenza Bianco per la collaborazione alla misura delle proprietà direzionali, Anna pellegrino e Valerio R.M. Lo Verso, co-tutor della tesi di dottorato in Energetica di Luigi Giovannini di cui questa attività fa parte integrante.

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 MATERIALE E METODO.....	5
3 CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ OTTICHE E SOLARI EMISFERICHE.....	6
4 CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ DIREZIONALI.....	10
5 ANALISI NUMERICA.....	20
5.1 WORKFLOW.....	20
5.2 CONSIDERAZIONI.....	24
5.3 CASO STUDIO.....	24
5.4 RISULTATI.....	26
5.4.1 <i>Confronto tra vetro termocromico e vetro selettivo</i> .....	27
<i>Prestazione energetica</i> .....	27
5.4.1.2 <i>Comfort visivo</i> .....	28
<i>Abbagliamento</i> .....	28
5.4.2 <i>Effetto della variazione dell'ampiezza dell'isteresi su prestazione energetica e comfort visivo</i> .....	30
5.4.3 <i>Frequenza degli stati termo-ottici</i> .....	33
5.5 DISCUSSIONE.....	34
6 CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI.....	34
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	36
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	36

## Sommario

L'utilizzo di sistemi dinamici e responsivi è di grande importanza negli edifici moderni, per la capacità di adattarsi a diverse condizioni di utilizzo, legate alle condizioni del microclima locale e ai profili di utenza dell'ambiente costruito. Un componente termocromico, ossia in grado di modificare le proprie caratteristiche ottiche in funzione della temperatura superficiale, è stato oggetto di approfondite analisi numeriche e sperimentali, per valutarne le potenzialità per applicazioni in edilizia, in particolare in edifici commerciali. La prima parte della caratterizzazione sperimentale ha riguardato la misura della trasmittanza e riflettanza emisferiche al variare dell'angolo di incidenza e della temperatura del campione, con misure con spettrofotometro con sfera integratrice di 75 cm. Le misure hanno evidenziato una notevole variazione della trasmittanza visibile, meno di quella solare, essenzialmente dovuta a capacità di variazione ridotte nello spettro dell'infrarosso vicino. Il secondo set di misure aveva come obiettivo quello di analizzare gli aspetti direzionali della trasmissione luminosa in regime di illuminazione diffuso. Le misure sono state eseguite con un goniometro per l'analisi direzionale e con una sfera da 20 cm per generare il campo di illuminazione diffusa sul campione. Le misure sono state eseguite per diverse temperature e per diversi angoli di osservazione, evidenziano una forte dipendenza delle grandezze direzionali da queste due parametri; in seguito a questa analisi si è potuto quindi dimostrare la criticità del componente in quei casi in cui si richieda una elevata stabilità della percezione visiva. È stata infine eseguita un'approfondita analisi numerica per valutare le prestazioni di una vetrata termocromica sia in termini di comfort visivo, che di prestazioni energetiche, tenendo conto dei consumi per illuminazione, raffrescamento e riscaldamento. Le simulazioni sono state eseguite per diverse condizioni climatiche ed hanno dimostrato che, mentre sul lato comfort il termocromico è più efficace di vetrate statiche, dal lato energetico le prestazioni sono fortemente influenzate dalla ripartizione degli usi energetici, funzione a loro volta delle condizioni climatiche. È stata infine eseguita un'accurata analisi per valutare l'impatto dell'isteresi nelle vasi transitorie di colorazione e decolorazione del vetro, dimostrando che questa ha un impatto trascurabile sui consumi complessivi del sistema.

## 1 Introduzione

Negli ultimi anni la Ricerca in ambito involucro edilizio si è indirizzata verso soluzioni a carattere *adattivo e responsivo*, soluzioni in grado, cioè, di modificare le proprie prestazioni ottiche e termiche al fine di adattarsi e rispondere alle sollecitazioni dell'ambiente esterno, minimizzando da un lato la domanda energetica e garantendo, dall'altro, livelli di qualità ambientale indoor elevati [1], [2].

Tra i componenti di involucro edilizio trasparente che esibiscono un comportamento dinamico le vetrate cromogeniche rappresentano la tecnologia con maggiore storia e costante interesse. Tra le diverse tipologie di cromogenici (termocromici e fotocromici, per la tipologia passiva [3] ed elettrocromici, cristalli liquidi e Suspended Particle Devices, per la tipologia attiva) i vetri termocromici sono stati oggetto di continui miglioramenti tecnologici e hanno iniziato a guadagnare sempre maggiore attenzione tra i progettisti, anche grazie al carattere autoregolante. I vetri termocromici sono vetri in grado di modificare le proprie proprietà ottiche in funzione della temperatura. In particolare al di sotto della temperatura di transizione (circa 20°C) il vetro si presenta chiaro e trasparente alle radiazioni visibili e NIR. Al di sopra della temperatura di transizione il vetro inizia a diventare colorato (verde) e riduce progressivamente la trasmissione solare e luminosa, in modo selettivo, garantendo cioè un buon controllo solare senza penalizzare l'illuminazione naturale.

Da questa tipologia si è quindi partiti per sviluppare l'attività di ricerca qui presentata, che si colloca in un contesto ben più ampio oggetto di sviluppi futuri.

L'adozione di soluzioni a prestazione variabile implica infatti da un lato la necessità di una caratterizzazione spinta del comportamento prestazionale nelle diverse condizioni ambientali e dall'altro lo sviluppo di nuove metodologie di valutazione e di modellazione. In particolare una delle maggiori criticità quando si opera con componenti trasparenti dinamici è data dalla corretta valutazione della prestazione globale (domanda energetica per il riscaldamento, il raffrescamento e l'illuminazione artificiale che tenga conto correttamente della dinamica del componente a livello ambiente/edificio). Inoltre è necessario superare l'approccio energy-oriented a favore di un approccio integrato che veda, nella gestione ottimizzata di componenti dinamici, gli aspetti legati alla qualità dell'ambiente interno e al comfort visivo [4] se non prioritari almeno paritari rispetto all'efficienza energetica.

## 2 Materiale e metodo

Il vetro oggetto di analisi è un vetrocamera composto (partendo dall'esterno) da un vetro stratificato, formato da due lastre di vetro con interposto uno strato PVB termocromico (44.3), un'intercapedine di argon ed un vetro bassoemissivo magnetronico. Il campione sottoposto a caratterizzazione è il solo vetro stratificato di dimensioni 40x40 cm.

Una stima accurata del contributo di sistemi di involucro dinamici e adattivi al miglioramento delle prestazioni energetiche e al comfort termico e visivo per l'utente, richiede dati di sperimentali affidabili, spesso di difficile reperibilità. Al fine di esplorare in modo esaustivo potenzialità e limiti del prodotto in esame, il lavoro è stato quindi impostato in una serie di fasi successive:

- Misura in laboratorio della trasmittanza angolare e della riflettanza quasi - normale emisferica, con particolare attenzione all'evoluzione delle quantità ottiche in funzione della temperatura del campione;
- Misura in laboratorio della trasmittanza angolare-direzionale a diverse temperature del campione in esame;
- Analisi numerica di un ambiente a uso ufficio di riferimento, per l'analisi del materiale in esame in diverse zone climatiche, a partire dalle quantità ottiche e solari misurate.

### 3 Caratterizzazione delle proprietà ottiche e solari emisferiche

L'analisi sperimentale è stata condotta presso i laboratori del Centro di Ricerche Casaccia di ENEA [5]. L'apparato sperimentale utilizzato è uno spettrofotometro assemblato per misure di sistemi complessi ed è composto dai seguenti elementi:

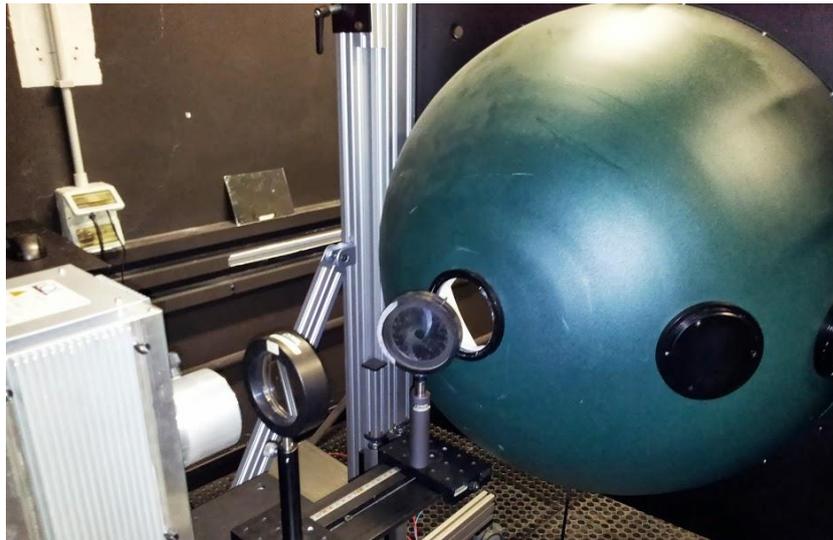
- Due sorgenti luminose. Una lampada al tungsteno con potenza regolabile dai 250 ai 1000 Watt per misure da 400 a 2300 nanometri. Una lampada allo xenon da 300 Watt per misure dai 350 a 900 nanometri. Lo spettro di analisi è generalmente scelto in funzione delle singole campagne sperimentali. Il diametro del raggio collimato può essere modulato attraverso un diaframma in funzione della tipologia di misura. Generalmente i diametri del fascio sono compresi tra i 4 e i 10 centimetri. Per la presente campagna è stata utilizzata la sola sorgente all xenon, il cui intervallo di lavoro consente di coprire tutto lo spettro visibile e il 93% dello spettro solare, considerato come valore sufficiente per le analisi del presente lavoro.
- Una sfera integratrice con un diametro di 75 centimetri composta da un involucro di alluminio e rivestita internamente di Spectralon, un materiale con una riflettività superiore al 95% nell'intero spettro solare (300-2500 nanometri). Sulla sfera sono presenti diverse porte al fine di poter compiere misure di riflettanza, trasmittanza ed assorbanza. Il laboratorio dispone di una seconda sfera con diametro da 100 centimetri e rivestimento in solfato di bario, con ottima risposta nello spettro visibile ma caduta rapida nello spettro del vicino infrarosso, che la rende dunque non adatta a misure nell'intervallo solare.
- Il sistema di rilevamento è uno spettrofotometro costituito da tre array spettrometrici e da 3 sensori: NMOS (detector al silicio) che copre uno spettro compreso tra i 250 e i 1000 nanometri (dispersione 1,4 nm/pixel); InGaAs (detector ad arseniuro di gallio) che copre uno spettro compreso tra i 900 e i 1700 nanometri (dispersione 3,125 nm/pixel); ExtInGaAs (detector ad arseniuro di gallio esteso e raffreddato) che copre uno spettro compreso tra i 1600 e i 2500 nanometri (dispersione 3,52 nm/pixel). Uno strumento di questo tipo, pur non raggiungendo l'accuratezza dei tradizionali monocromatori, è estremamente utile quando è necessario eseguire misure rapidi, su campioni le cui caratteristiche possono cambiare rapidamente nel tempo, come nella campagna sperimentale in esame.

In figura 1 si osserva la sfera integratrice, la sorgente luminosa allo xenon con il sistema di lente e diaframma, e la porta di ingresso del fascio luminoso per misure di riflessione ad incidenza quasi - normale.

La procedura di misura è la seguente:

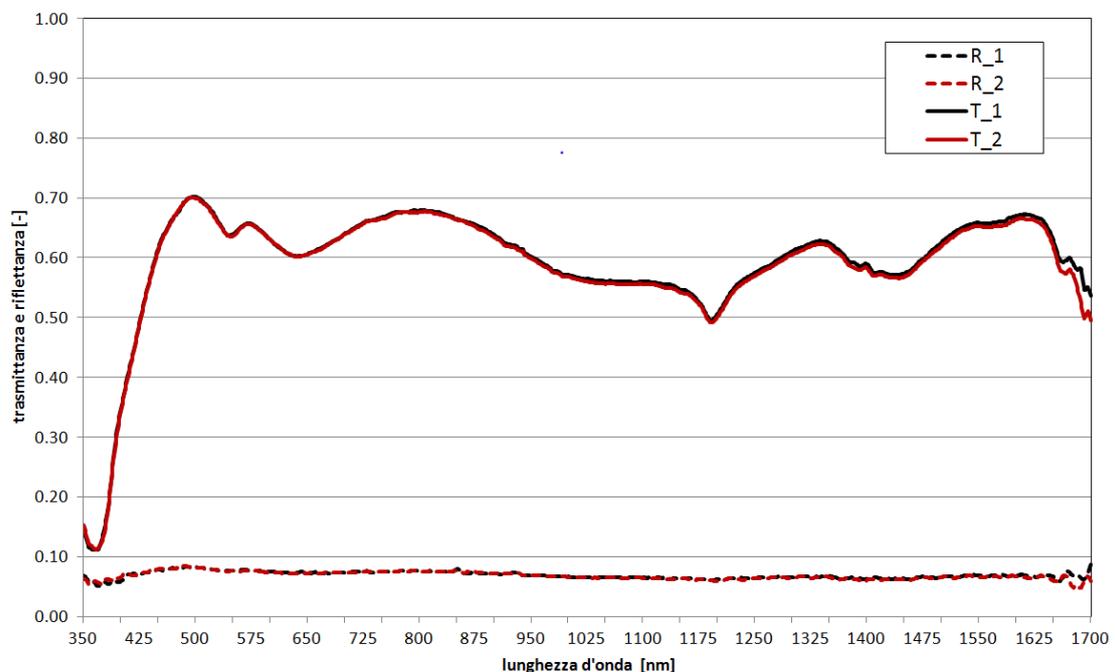
- Il campione interessato dalla misura è collocato in corrispondenza della porta campione. L'utilizzo di un sostegno permette la perfetta adiacenza tra campione e sfera cosicché la misura sia precisa e non vi sia dispersione laterale. La dimensione della porta è regolabile in funzione delle dimensioni del campione da misurare (diametro della porta varia in un range 10-25 cm).
- Per misure di trasmittanza la lampada è collocata in posizione normale rispetto la porta frontale; la sorgente poggia su un braccio goniometrico che consente di eseguire misure ad angoli di incidenza variabile. Per misure in riflessione invece la lampada andrà posizionata in corrispondenza della porta posteriore, come si vede in figura 2, e la misura è eseguita ad incidenza quasi-normale, circa 8°C, per ragioni di geometria. La riflettanza di materiali diffondenti e regolari è di fatto identica a 0 e 8°C di incidenza, di conseguenza per brevità e congruenza di presentazione con le misure di trasmittanza, anche le misure in riflettanza saranno indicate come ad incidenza normale

Le misure di riflettanza e trasmittanza del campione sono misurate come il rapporto tra la potenza radiante riflessa/trasmessa dal campione montato sull'apertura della sfera e l'energia che entra all'interno della sfera nelle condizioni di riferimento. Nel caso di misura di riflettanza il riferimento è quello di un campione di Spectralon a riflettanza spettrale certificata; per le misure di trasmittanza, il riferimento è la potenza radiante che entra direttamente nella sfera. Essendo uno strumento a raggio singolo, la misura diretta è successivamente corretta con il metodo di correzione della porta ausiliaria (substitution error).



**Figura 1 – Vista parziale dell'apparato sperimentale ENEA per misure ottiche su sistemi trasparenti complessi**

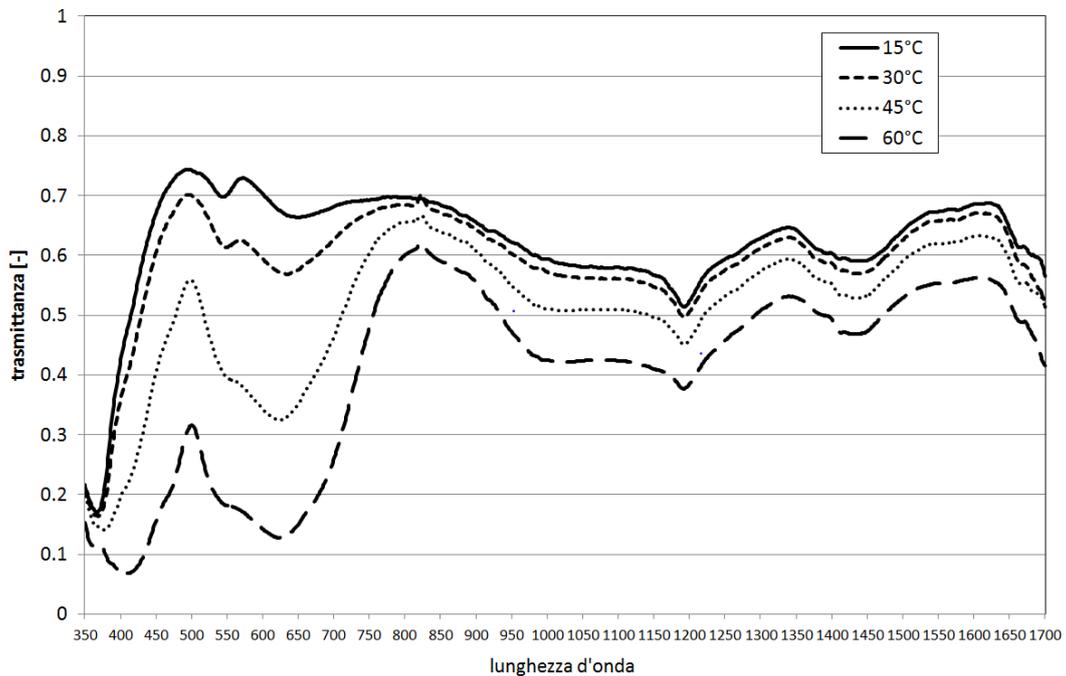
Per semplicità di gestione del dato, i valori misurati sono rielaborati ed interpolati, in modo da fornire il valore della misura per ogni nanometro dello spettro analizzato. Le misure sono state inoltre eseguite in funzione di diverse temperature superficiali del campione, e analizzando la diversa risposta del materiale in fase di riscaldamento e raffreddamento. Il primo set di misura aveva l'obiettivo di verificare se le proprietà ottiche risultavano essere differenti sulle 2 facce. La figura 2 riporta l'andamento di trasmittanza e riflettanza spettrale normale, misurate sulle due facce: i grafici evidenziano come, a meno di interferenze di misura agli estremi dello spettro, non sussistano differenze significative per le due grandezze. Per tale motivo le misure sono state eseguite su una sola faccia, indicata dal produttore come quella esterna.



**Figura 2 – Trasmittanza spettrale in funzione di diversi valori della temperatura del campione**

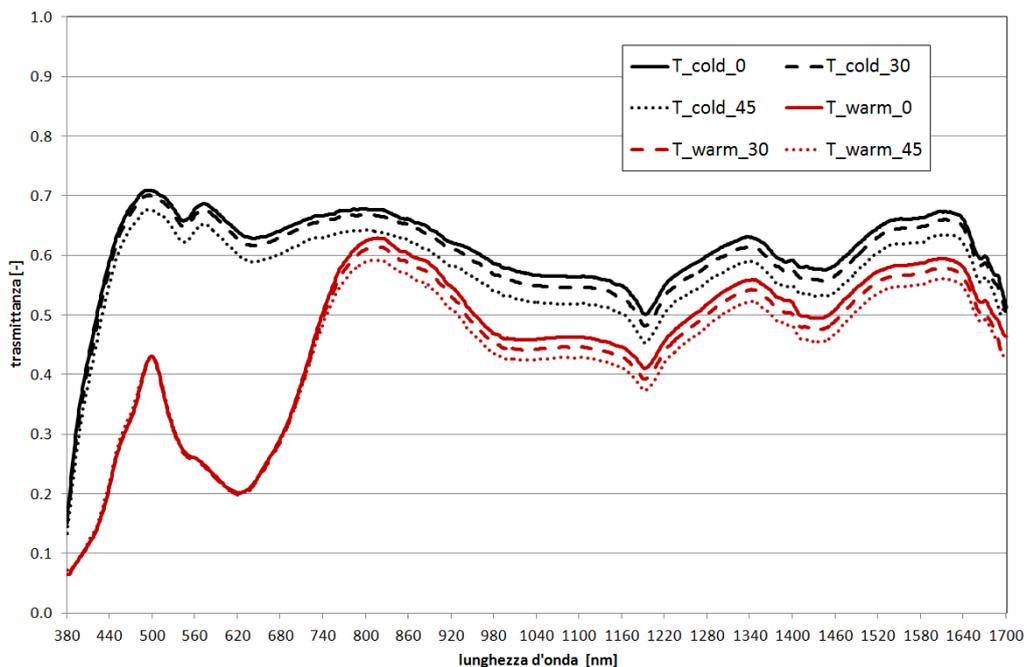
La figura 3 riporta l'andamento della trasmittanza spettrale normale per 4 valori tipici di esercizio del sistema vetrato, tra 15 e 60°C di temperatura superficiale. Si noti la variazione contenuta della radiazione trasmessa tra 15 e 30°C. variazioni sensibili sono invece misurate per gli altri salti termici. Le misure

presentate sono state eseguite in fase di riscaldamento, ossia è stato portato il campione alla minima ed è stato misurato per i salti termici ritenuti di interesse.

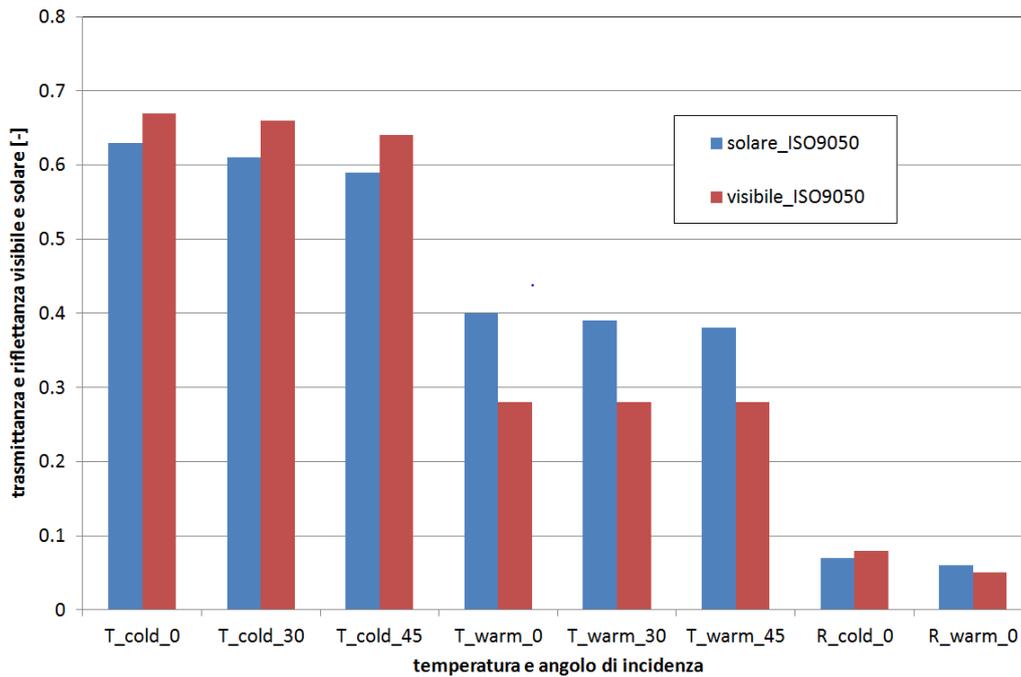


**Figura 3 – Trasmittanza spettrale in funzione di diversi valori della temperatura del campione**

Le misure spettrali sono state inoltre seguite per diversi angoli di incidenza: 10, 30 e 45°C, con il campione negli stati freddo (22°C) e caldo (55°C). Le misure, riportate in figura 4, mostrano la dipendenza angolare della trasmittanza in funzione della radiazione incidente. Le curve mostrano una variazione limitata, essendo l'analisi limitata ai 45° di inclinazione, misure ad angoli più elevati non sono state eseguite per l'impossibilità di mantenere la temperatura superficiale costante a temperature elevate.



**Figura 4 – Trasmittanza spettrale in funzione di angoli di incidenza della radiazione**



**Figura 5 – Trasmissione angolare e riflettanza, solare e luminosa**

In figura 5 si riporta l'andamento della trasmittanza luminosa e solare per i diversi angoli di incidenza, indicati precedentemente, nonché la riflettanza solare e luminosa ad incidenza normale. Le misure integrate sono state ricavate a partire dalle misure spettrali secondo le procedure definite nella norma internazionale *ISO 9050:2003 - Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors* [6]. I grafici a barre confermano la dipendenza angolare già osservabile dai dati spettrali, nonché che la riflettanza normale è di fatto indipendente dalla temperatura superficiale del campione. In figura 6 si riporta l'andamento della trasmittanza luminosa e solare nella fase di riscaldamento del campione per diversi stati di temperatura superficiale. Dalla figura si evince un'ottima risposta dinamica nello spettro visibile, con un rapporto tra trasmittanza massima e minima di 5.4; la risposta è più contenuta su tutto lo spettro solare, con un rapporto massimo/minimo di 2.4. Il comportamento è legato allo switching molto limitato nello spettro del vicino infrarosso, come si evince dalla figura 2 ed è confermato dal rapporto tra i valori massimo e minimo che, per questo intervallo, non supera 1.3.

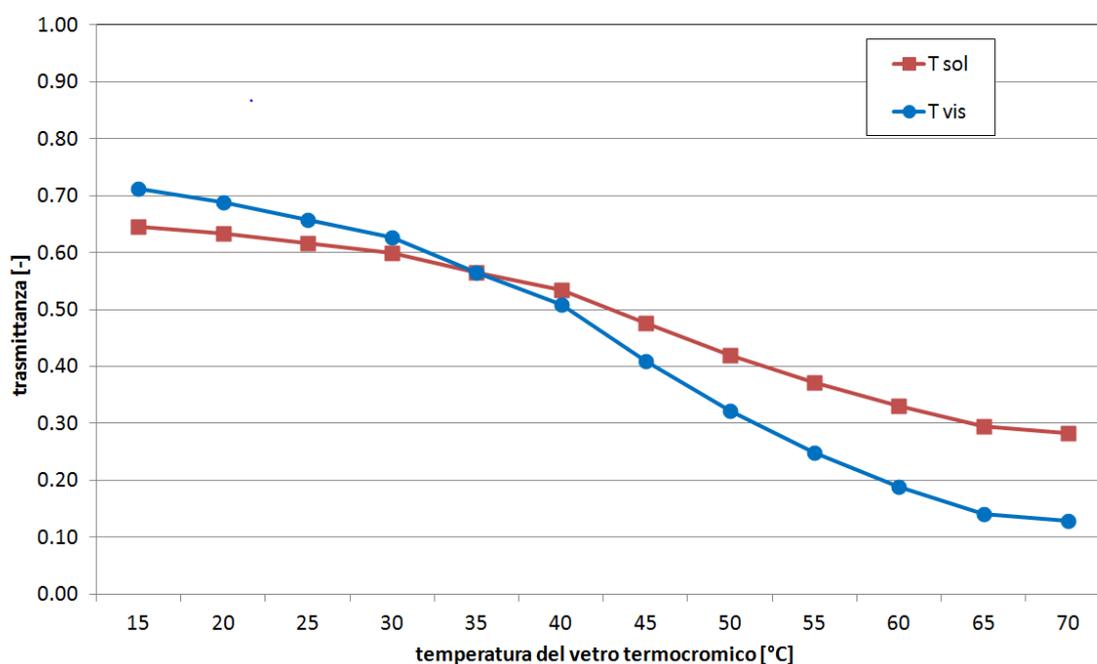


Figura 3 – Trasmissione luminosa e solare del vetro termocromico in funzione dei diversi valori della temperatura

I risultati dalla campagna di misura evidenziano che il prodotto si presta ad interessanti applicazioni per quanto riguarda il comfort visivo e la protezione dell'abbagliamento, visto l'elevato range di modulazione che il sistema vetrato garantisce nello spettro visibile. Diversa è la risposta del prodotto in termini di protezione solare, controllo del surriscaldamento e miglioramento delle prestazioni energetiche, soprattutto durante la stagione estiva. Ipotizzando un utilizzo della tecnologia tipicamente in facciata, è prevedibile che le temperature superficiali superino raramente i 55°C durante la stagione estiva situazione che implica un'ampiezza di switch difficilmente superiore a 1.6. Sulla base di questi risultati e considerazioni, appare necessaria un'accurata analisi numerica per stabilire le potenzialità della tecnologia come soluzione energeticamente efficiente e in grado di migliorare la qualità ambientale dello spazio costruito.

Un'altra problematica da evidenziare è la qualità della misura legata al controllo della temperatura durante l'esecuzione della prova, in alcuni range particolarmente critico. Questo spiega ad esempio le piccole discrepanze delle misure di trasmittanza normale nei due set: ad incidenza variabile e a temperatura variabile; nel primo caso la temperatura minima raggiunta è risultata essere di 1-2°C più alta del target (20°C), con la conseguente diminuzione della trasmittanza rispetto al secondo caso. Questi risultati evidenziano la necessità di standardizzare processi di misura nel caso di materiali responsivi e dinamici, per garantirne la ripetibilità e riproducibilità.

## 4 Caratterizzazione delle proprietà direzionali

Al fine di valutare il comportamento del sistema vetrato nelle applicazioni si è definita la seguente procedura sperimentale [7]:

- **Condizioni di illuminazione:** l'illuminazione emisferica, ottenuta mediante una sfera integratrice aderente alla superficie esterna del campione, simula la condizioni di illuminazione diurna quando non è presente il contributo solare diretto.
- **Condizioni di osservazione:** sono state individuate 4 direzioni di osservazione, poste sul piano orizzontale e inclinate rispetto alla normale alla superficie del campione di 0°, 15°, 30° e 45°.

Queste condizioni coprono gli angoli di osservazione più significativi in tipiche applicazioni, ad esempio coprono una stanza con larghezza di 4 m quando l'osservatore si trova a 2 m dalla superficie vetrata.

- **Temperatura del campione:** non essendo possibile eseguire le misure goniometriche a temperatura costante, si è riscaldato il campione alla temperatura di 75 °C per 24 h, al fine di avere una elevata omogeneità di temperatura su tutta la massa del campione. Successivamente, il campione è stato montato sul goniofotometro, ad angolo fisso, e le misure eseguite durante il transitorio di temperatura fino al raggiungimento della temperatura ambiente.
- **Misura della trasmittanza spettrale:** la trasmittanza spettrale nella direzione di osservazione è stata ottenuta dal rapporto tra la radianza spettrale della radiazione emessa dalla sfera integratrice nella data direzione con il campione interposto tra la finestra della sfera e lo strumento di misura e la radianza spettrale misurata nelle stesse condizioni ma senza campione.
- **Misura della traslucenza (*haze*):** la misura della traslucenza non ha seguito metodi standard (ad esempio [1]) in quanto non applicabili direttamente in caso di misurazioni goniometriche, ma è stata ottenuta mediante misure di perdita di contrasto di target visti con o senza il campione interposto.

La sfera usata ha diametro pari a 200 mm e finestra di uscita di 60 mm. La corrente di alimentazione è stata regolata in modo da simulare un illuminante A e mantenuta costante per tutta la durata delle prove. La ripartizione dell'intensità luminosa della sorgente è lambertiana, fino a un angolo di 85° dalla normale della finestra della sfera con una tolleranza del 1,5 % rispetto al valore teorico.

Le misure spettrali sono state eseguite a passi di 4 nm con banda passante di 4 nm nel campo da 360 a 730 nm. Per i calcoli colorimetrici questi valori sono stati interpolati linearmente a passo di 1 nm. L'incertezza di misura della trasmittanza è pari a 1,3%.

La temperatura della superficie (verso l'interno) del sistema vetrato è stata misurata con termocoppia aderente alla superficie a circa 5 cm dall'area illuminata dalla sfera. Sebbene il sistema di misura presentasse un'incertezza di 0,2 °C, l'incertezza sulla misura della temperatura è stimata in 1 °C, per l'influenza della superficie e condizioni di contatto.

La misura della traslucenza è stata eseguita misurando con un sistema ILMD (Image Luminance Measurement Device) il contrasto tra bande nere e trasparenti di un target appositamente realizzato. Questa tecnica permette di ottenere un indice correlato con le effettive condizioni di visione dell'ambiente esterno (view-through). L'incertezza di misura sulla variazione di contrasto è dello 0,5 %. Il metodo può essere ulteriormente migliorato osservando il gradiente di luminanza tra la zona trasparente e quella nera. Analisi sono in corso per correlare questa misura con parametri tradizionali, ad esempio l'*haze*. Il vantaggio della tecnica proposta consiste nel fatto che può essere realizzata con un sistema ILMD, nel corso di una misurazione di tipo goniometrico, senza ricorrere a tecniche più costose anche in termini di tempo di misura.

Tutte le incertezze di misura sono indicate come incertezza estesa ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura  $k = 2$ , che corrisponde ad una probabilità di copertura di circa il 95 %.

Nelle figure da **Figura 1** a **Figura 4** è riportata la trasmittanza spettrale emisferica direzionale al variare della temperatura del campione per le 4 direzioni di osservazione sopra indicate.

Nelle tabelle da **Tabella 1** a **Tabella 4** è riportata la frazione della luminanza trasmessa dal sistema vetrato termocromico, per diverse sorgenti luminose, al variare della temperatura e per le direzioni di osservazione sopra indicate. Per generalità, le sorgenti selezionate rappresentano sia condizioni di illuminazione diurna sia condizioni di illuminazione interna.

Nelle figure da **Figura 5** a **Figura 8** è riportata la variazione delle coordinate tricromatiche CIE 1931 al variare della temperatura quando il sistema vetrato viene illuminato con un illuminante D65 e osservato per le direzioni sopra indicate.

La **Figura 9** visualizza la tecnica sperimentale proposta per la misurazione della traslucenza. I risultati ottenuti hanno evidenziato una perdita minima di contrasto compresa tra il 2 % e il 5 %.

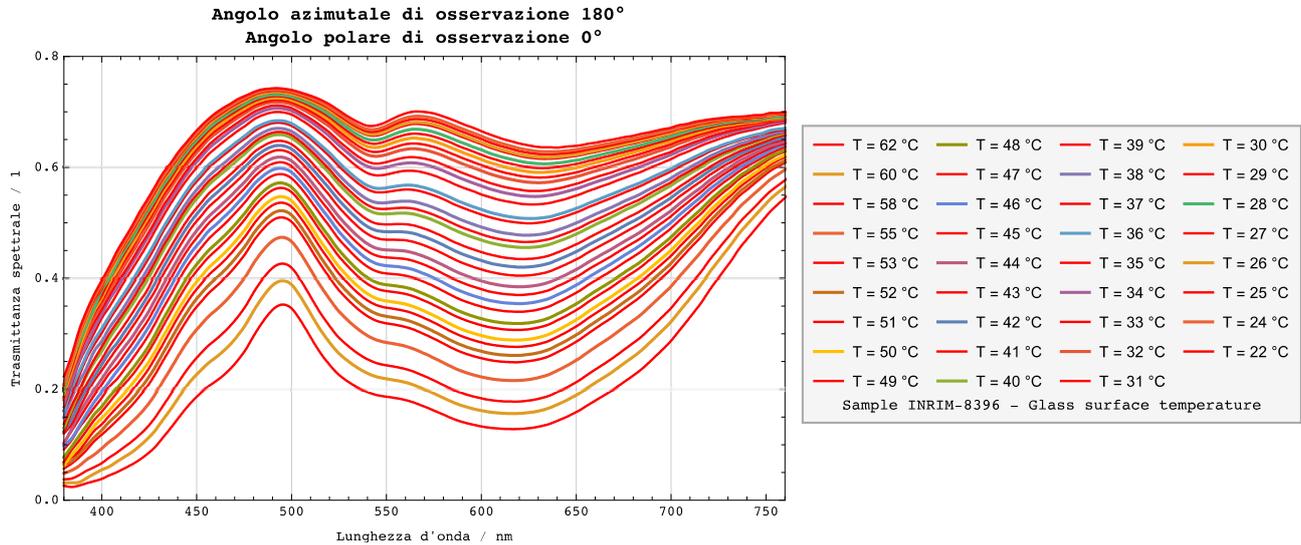


Figura 1 Trasmittanza del sistema vetrato termocromico al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 0°.

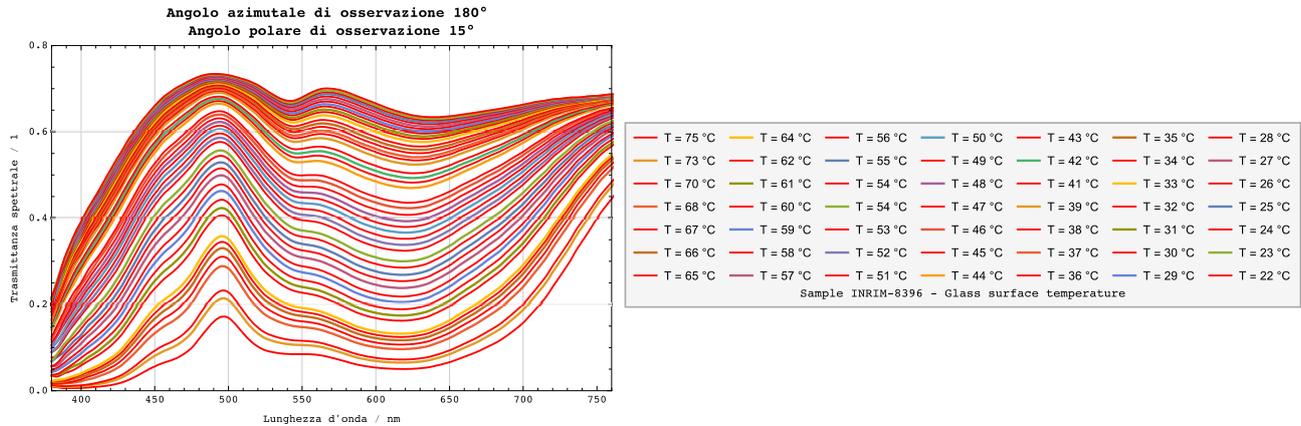


Figura 2 Trasmittanza del sistema vetrato termocromico al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 15°.

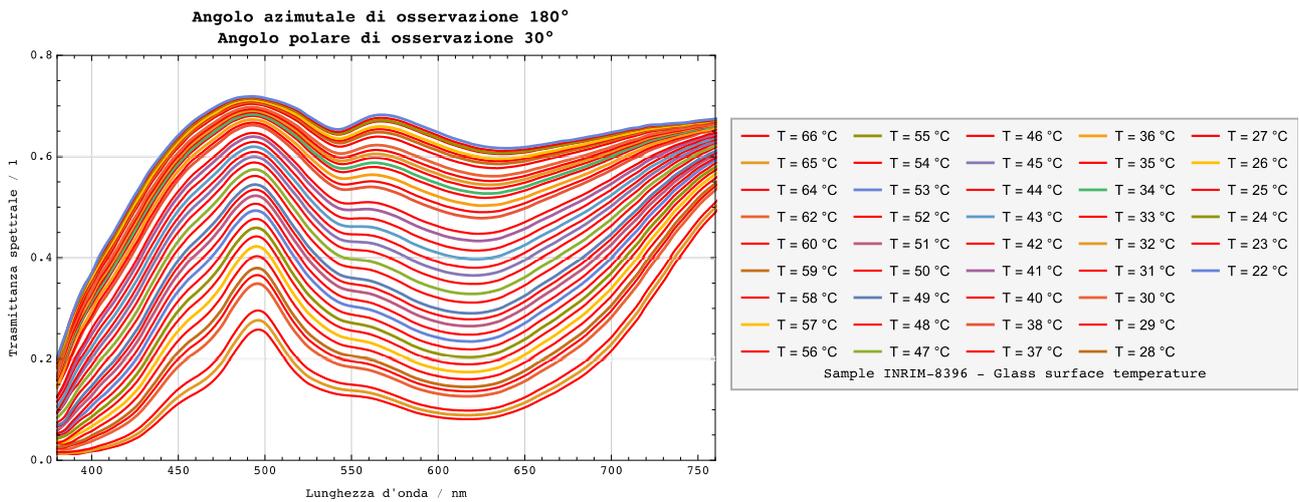


Figura 3 Trasmittanza del sistema vetrato termocromico al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 30°.

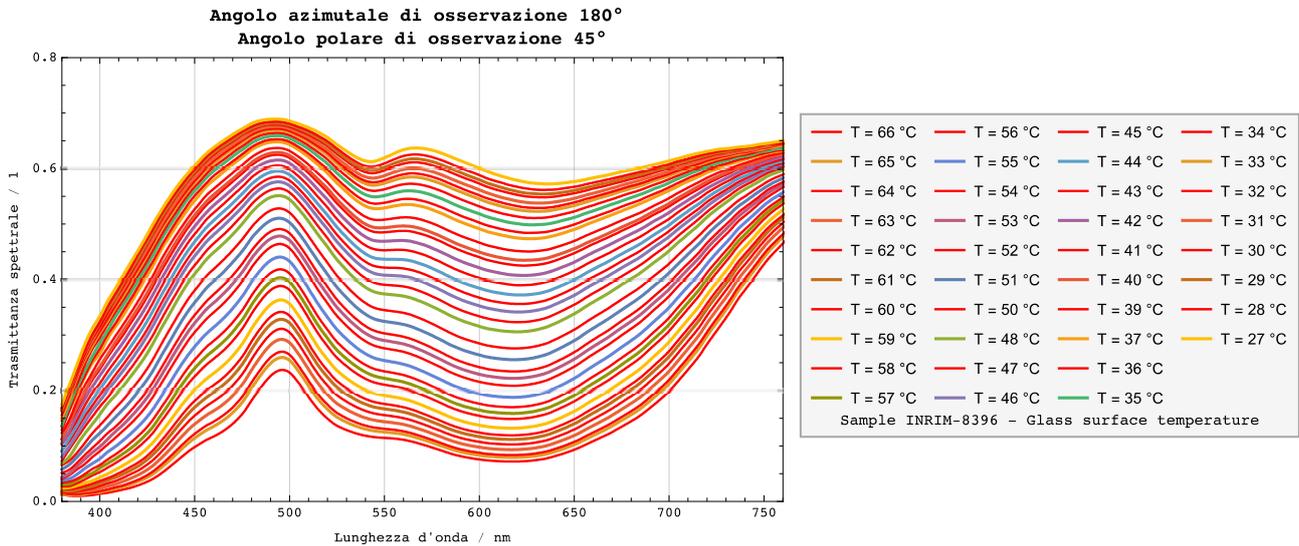


Figura 4 Trasmittanza del sistema vetrato termocromico al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 45°.

Tabella 1 Frazione della luminanza trasmessa dal sistema vetrato termocromico, per diverse sorgenti luminose, al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 0 °C.

Sorgente	Caratteristiche	Fattore di trasmissione				
		Temperatura				
		65	55	45	35	25
		°C	°C	°C	°C	°C
<b>CIE E</b>	Equi-energetic illuminant		0,291	0,446	0,595	0,676
<b>CIE A</b>	Planckian radiator (2 856 K)		0,275	0,431	0,584	0,669
<b>CIE D65</b>	Phase of daylight (6 500 K)		0,295	0,451	0,598	0,678
<b>CIE F1</b>	CIE standard fluorescent source		0,289	0,445	0,595	0,677
<b>CIE F2</b>			0,276	0,432	0,587	0,673
<b>CIE F3</b>			0,268	0,425	0,582	0,671
<b>CIE F4</b>			0,262	0,419	0,579	0,669
<b>CIE F5</b>			0,289	0,444	0,595	0,677
<b>CIE F6</b>			0,274	0,431	0,586	0,673
<b>CIE F7</b>			0,292	0,447	0,595	0,676
<b>CIE F8</b>			0,289	0,444	0,593	0,675
<b>CIE F9</b>			0,282	0,437	0,589	0,673
<b>CIE F10</b>			0,278	0,432	0,583	0,666
<b>CIE F11</b>			0,273	0,427	0,579	0,664
<b>CIE F12</b>			0,266	0,420	0,575	0,661
<b>HALOGEN</b>	Halogen lamp (3 200 K)		0,279	0,434	0,587	0,671
<b>HID HQI-TS</b>	Metal halide discharge lamp (3 200 K)		0,270	0,426	0,581	0,667
<b>LED 3100</b>	LED (3 100 K)		0,271	0,427	0,583	0,669
<b>LED 4000</b>	LED (4 000 K)		0,277	0,434	0,587	0,672
<b>LED 6000</b>	LED (6 000 K)		0,285	0,441	0,593	0,676

Tabella 2 Frazione della luminanza trasmessa dal sistema vetrato termocromico, per diverse sorgenti luminose, al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 15 °C.

Sorgente	Caratteristiche	Fattore di trasmissione				
		Temperatura				
		65	55	45	35	25
		°C	°C	°C	°C	°C
<b>CIE E</b>	Equi-energetic illuminant	0,186	0,348	0,507	0,616	0,674
<b>CIE A</b>	Planckian radiator (2 856 K)	0,174	0,332	0,494	0,607	0,668
<b>CIE D65</b>	Phase of daylight (6 500 K)	0,189	0,353	0,511	0,619	0,675
<b>CIE F1</b>	CIE standard fluorescent source	0,184	0,346	0,506	0,617	0,675
<b>CIE F2</b>		0,174	0,332	0,495	0,610	0,672
<b>CIE F3</b>		0,168	0,324	0,489	0,607	0,670
<b>CIE F4</b>		0,163	0,318	0,484	0,604	0,669
<b>CIE F5</b>		0,184	0,346	0,506	0,617	0,676
<b>CIE F6</b>		0,173	0,331	0,494	0,610	0,672
<b>CIE F7</b>		0,187	0,349	0,508	0,617	0,674
<b>CIE F8</b>		0,184	0,346	0,505	0,615	0,673
<b>CIE F9</b>		0,179	0,339	0,500	0,611	0,671
<b>CIE F10</b>		0,176	0,334	0,494	0,605	0,664
<b>CIE F11</b>		0,172	0,328	0,489	0,602	0,662
<b>CIE F12</b>		0,166	0,321	0,483	0,598	0,660
<b>HALOGEN</b>	Halogen lamp (3 200 K)	0,176	0,335	0,497	0,609	0,669
<b>HID HQI-TS</b>	Metal halide discharge lamp (3 200 K)	0,168	0,326	0,489	0,604	0,666
<b>LED 3100</b>	LED (3 100 K)	0,170	0,327	0,491	0,606	0,668
<b>LED 4000</b>	LED (4 000 K)	0,175	0,334	0,497	0,610	0,671
<b>LED 6000</b>	LED (6 000 K)	0,181	0,343	0,504	0,615	0,674

Tabella 3 Frazione della luminanza trasmessa dal sistema vetrato termocromico, per diverse sorgenti luminose, al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 30 °C.

Sorgente	Caratteristiche	Fattore di trasmissione				
		Temperatura				
		65	55	45	35	25
		°C	°C	°C	°C	°C
<b>CIE E</b>	Equi-energetic illuminant	0,140	0,278	0,441	0,579	0,657
<b>CIE A</b>	Planckian radiator (2 856 K)	0,130	0,263	0,426	0,569	0,651
<b>CIE D65</b>	Phase of daylight (6 500 K)	0,142	0,283	0,445	0,582	0,658
<b>CIE F1</b>	CIE standard fluorescent source	0,138	0,276	0,439	0,579	0,658
<b>CIE F2</b>		0,130	0,263	0,427	0,572	0,655
<b>CIE F3</b>		0,125	0,256	0,420	0,568	0,653
<b>CIE F4</b>		0,121	0,250	0,414	0,564	0,651
<b>CIE F5</b>		0,138	0,276	0,439	0,579	0,658
<b>CIE F6</b>		0,129	0,262	0,426	0,571	0,655
<b>CIE F7</b>		0,140	0,279	0,441	0,580	0,657
<b>CIE F8</b>		0,138	0,276	0,439	0,577	0,655
<b>CIE F9</b>		0,134	0,269	0,432	0,574	0,654
<b>CIE F10</b>		0,131	0,265	0,426	0,567	0,647
<b>CIE F11</b>		0,128	0,260	0,421	0,564	0,644
<b>CIE F12</b>		0,123	0,253	0,415	0,559	0,642
<b>HALOGEN</b>	Halogen lamp (3 200 K)	0,132	0,266	0,429	0,571	0,652
<b>HID HQI-TS</b>	Metal halide discharge lamp (3 200 K)	0,125	0,257	0,421	0,566	0,648
<b>LED 3100</b>	LED (3 100 K)	0,126	0,258	0,422	0,567	0,651
<b>LED 4000</b>	LED (4 000 K)	0,130	0,265	0,428	0,572	0,653
<b>LED 6000</b>	LED (6 000 K)	0,136	0,273	0,436	0,577	0,656

Tabella 4 Frazione della luminanza trasmessa dal sistema vetrato termocromico, per diverse sorgenti luminose, al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 45 °C.

Sorgente	Caratteristiche	Fattore di trasmissione				
		Temperatura				
		65	55	45	35	25
		°C	°C	°C	°C	°C
CIE E	Equi-energetic illuminant	0,127	0,261	0,430	0,559	
CIE A	Planckian radiator (2 856 K)	0,118	0,246	0,416	0,549	
CIE D65	Phase of daylight (6 500 K)	0,130	0,265	0,434	0,562	
CIE F1	CIE standard fluorescent source	0,126	0,259	0,429	0,559	
CIE F2		0,118	0,246	0,417	0,552	
CIE F3		0,113	0,239	0,410	0,548	
CIE F4		0,109	0,233	0,405	0,544	
CIE F5		0,126	0,259	0,429	0,559	
CIE F6		0,117	0,245	0,416	0,552	
CIE F7		0,128	0,262	0,431	0,560	
CIE F8		0,126	0,259	0,428	0,557	
CIE F9		0,122	0,252	0,422	0,554	
CIE F10		0,119	0,248	0,416	0,547	
CIE F11		0,116	0,243	0,411	0,544	
CIE F12		0,112	0,236	0,405	0,539	
HALOGEN	Halogen lamp (3 200 K)	0,120	0,249	0,419	0,551	
HID HQI-TS	Metal halide discharge lamp (3 200 K)	0,113	0,240	0,411	0,546	
LED 3100	LED (3 100 K)	0,114	0,241	0,412	0,548	
LED 4000	LED (4 000 K)	0,118	0,248	0,418	0,552	
LED 6000	LED (6 000 K)	0,123	0,256	0,426	0,557	

Angolo azimutale di osservazione 180°  
Angolo polare di osservazione 0°

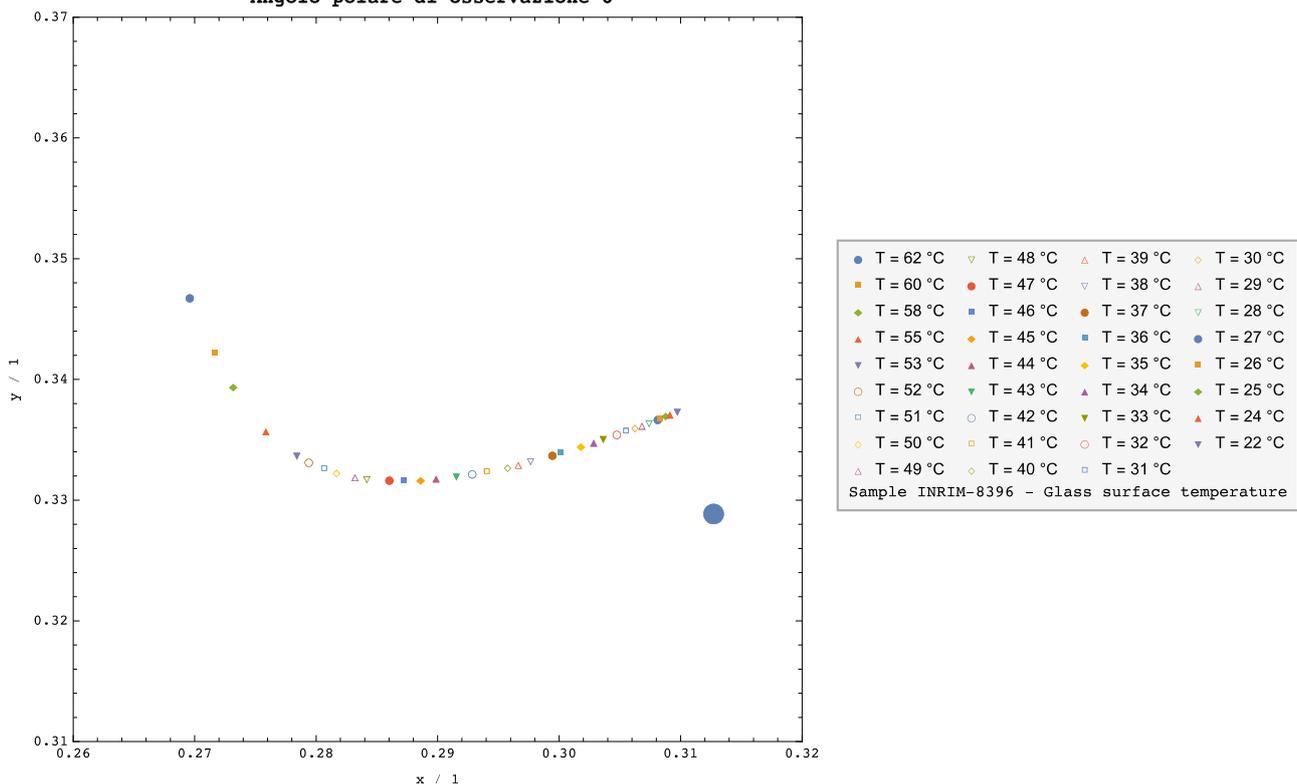


Figura 5 Coordinate tricromatiche nel sistema CIE 1931 del sistema vetrato termocromico illuminato dall'illuminante D65 al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 0°.

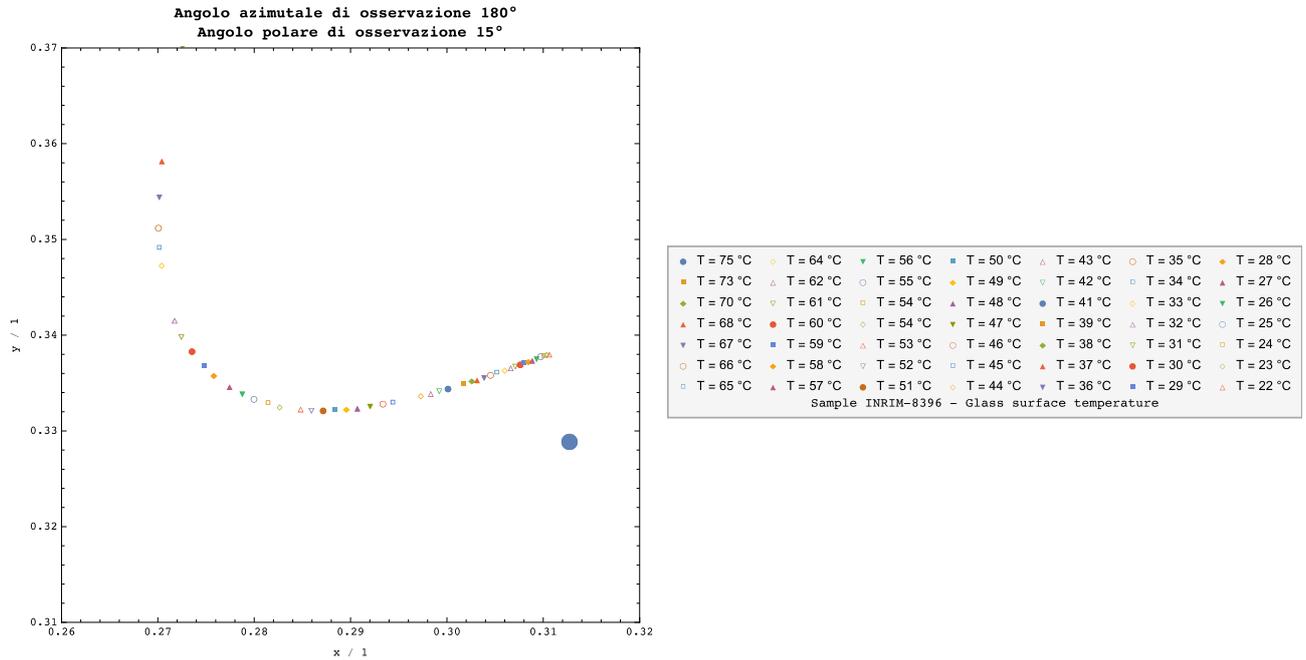


Figura 6 Coordinate tricromatiche nel sistema CIE 1931 del sistema vetrato termocromico illuminato dall'illuminante D65 al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 15°.

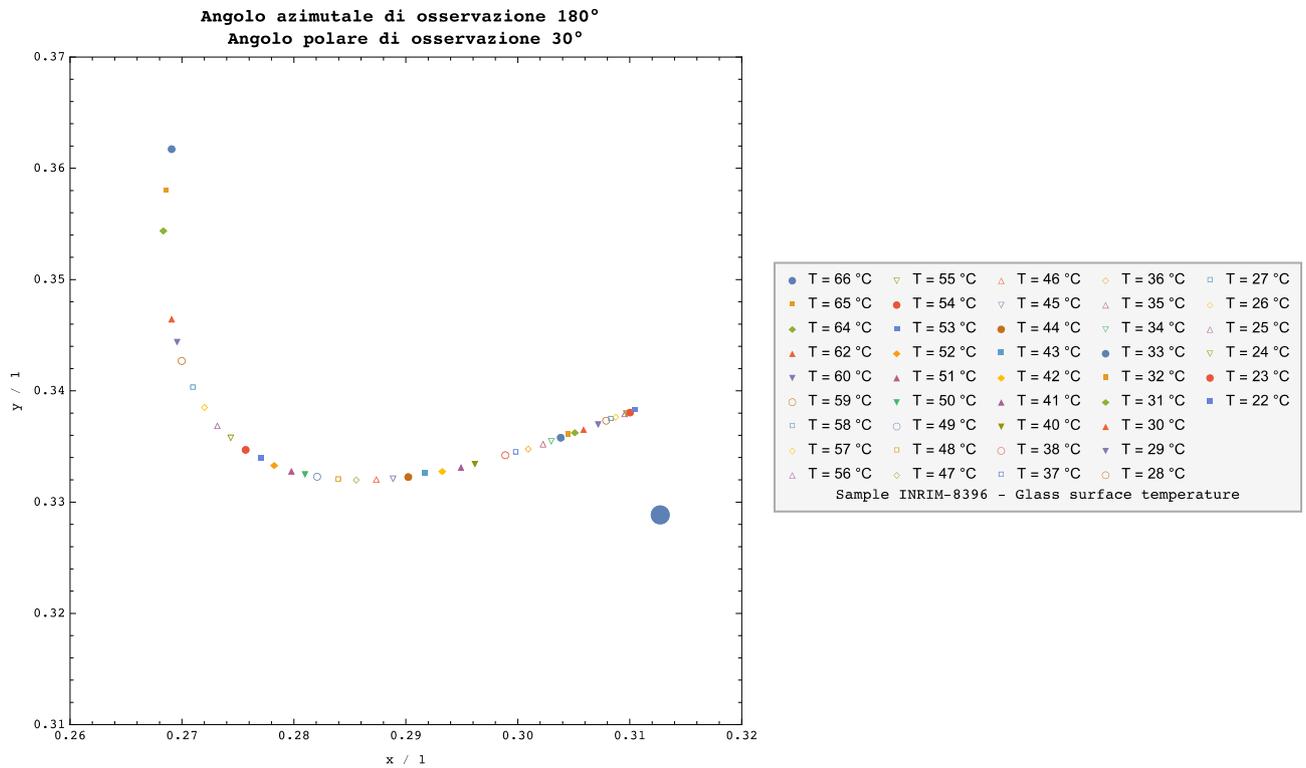


Figura 7 Coordinate tricromatiche nel sistema CIE 1931 del sistema vetrato termocromico illuminato dall'illuminante D65 al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 30°.

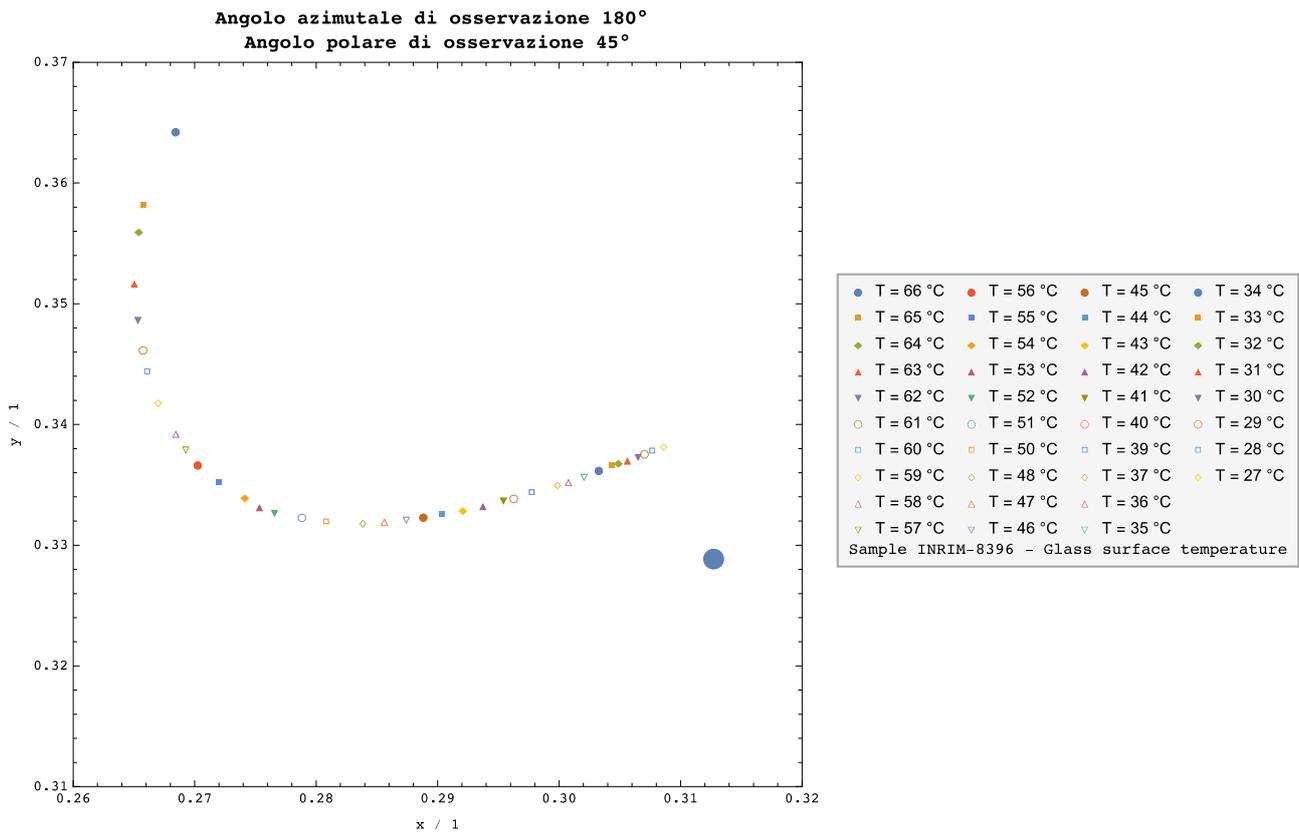


Figura 8 Coordinate tricromatiche nel sistema CIE 1931 del sistema vetrato termocromico illuminato dall'illuminante D65 al variare della temperatura e con angolo di osservazione di 45°.

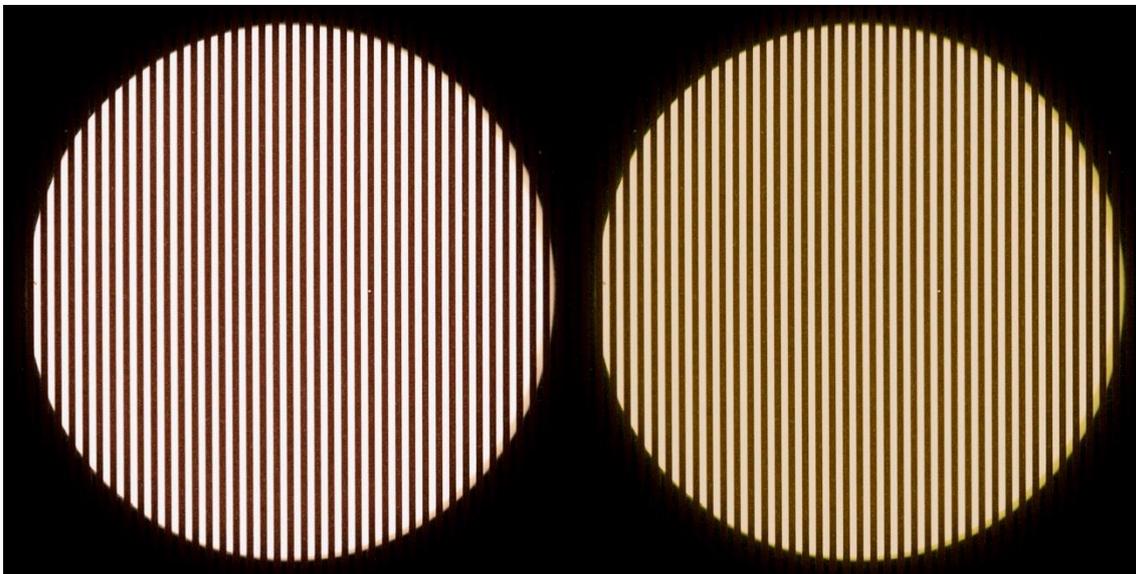


Figura 9 Esempio di misurazione della traslucenza. A sinistra l'immagine del target acquisita senza campione interposto, a destra con il campione presente.

Considerata la ridotta perdita di contrasto in tutto il campo di temperature misurato, il parametro che realmente influenza la qualità della visione via verso l'esterno (colori dell'ambiente esterno) sia nell'interno (colori delle superfici illuminate dalla radiazione trasmessa dal sistema vetrato) è la notevole variazione spettrale di quest'ultima sia con la temperatura e sia con la direzione di osservazione [8].

In particolare come evidenziato dai grafici, la variazione in termini di coordinate tricromatiche con la temperatura è tale da non rendere adatto il sistema vetrato in situazioni ove il compito visivo richiede una

elevata costanza nella percezione del colore e, contemporaneamente, il contributo della luce filtrata dal sistema spesso è predominante rispetto ad altre sorgenti di illuminazione nella zona del compito visivo.

## 5 Analisi numerica

Una volta effettuata la caratterizzazione sperimentale del componente, i risultati ottenuti sono stati utilizzati all'interno di una metodologia innovativa di simulazione dinamica in grado di valutare simultaneamente gli effetti del componente sul comfort visivo e sulla prestazione energetica annuali. Questo tipo di simulazioni numeriche prende il nome di "simulazione integrata", appunto perché è in grado di valutare contemporaneamente aspetti energetici e di comfort [9], [10]. In generale la simulazione integrata consente, facendo uso di un solo modello teorico, di effettuare simulazioni relative ad ambiti tra loro anche molto diversi (aspetti strutturali, performance energetica, aspetti di comfort, costi, ecc..), permettendo così di poter confrontare facilmente gli effetti di un'ipotesi progettuale sui differenti aspetti che si sceglie di tenere in considerazione. Per quanto riguarda gli aspetti considerati nell'analisi proposta, e cioè gli effetti di un componente adattivo sulla prestazione energetica e sul comfort visivo, sebbene alcuni tentativi siano stati fatti per integrare questi ultimi in un unico modello di simulazione, al momento non esiste una metodologia che consenta di valutarli con precisione. Infatti i metodi di simulazione integrata correntemente disponibili calcolano la performance annuale del componente adattivo come semplice somma di singoli stati statici, simulati indipendentemente l'uno dall'altro e poi uniti solamente a posteriori. Se per quanto riguarda l'ambito di comfort visivo questa operazione è fattibile, in quanto non crea inaccuratezze nel risultato finale, per gli aspetti di prestazione energetica invece essa porta con sé una serie di semplificazioni che producono inesattezze ed anche errori grossolani nei risultati. Nello specifico è possibile affermare che l'operazione sopra descritta non consente di tenere in considerazione nella simulazione la storia termica dell'edificio, sovrastimando o sottostimando quindi il ruolo giocato dalla dinamicità del componente adattivo. Ciò implica indirettamente l'impossibilità di tenere in considerazione fenomeni fisici complessi legati al comportamento di alcuni componenti adattivi, come per esempio il ritardo della risposta ad uno stimolo e soprattutto il comportamento isteretico di alcuni materiali.

Un'altra grande limitazione delle metodologie integrate attualmente disponibili risiede nel fatto che non è al momento possibile descrivere a livello simulativo il comportamento di un componente tenendo in considerazione driver appartenenti a domini fisici differenti.

Le limitazioni presenti nelle metodologie di simulazione integrata rendono queste ultime inutilizzabili per uno studio accurato degli effetti di un vetro termocromico su un edificio, in quanto le inesattezze negli assunti su cui esse si basano rendono i risultati soggetti ad un altissimo grado di imprecisione, senza contare che l'aspetto più interessante di questo componente, e cioè il suo comportamento isteretico [11], non può in alcun modo essere tenuto in considerazione nell'analisi. Per le ragioni sopra esposte è stata creata ad hoc una nuova metodologia di simulazione integrata che, tramite un radicale cambiamento nella logica di simulazione rispetto allo stato dell'arte, consente finalmente di risolvere le problematiche e le imprecisioni a cui le metodologie tradizionali sono soggette.

### 5.1 Workflow

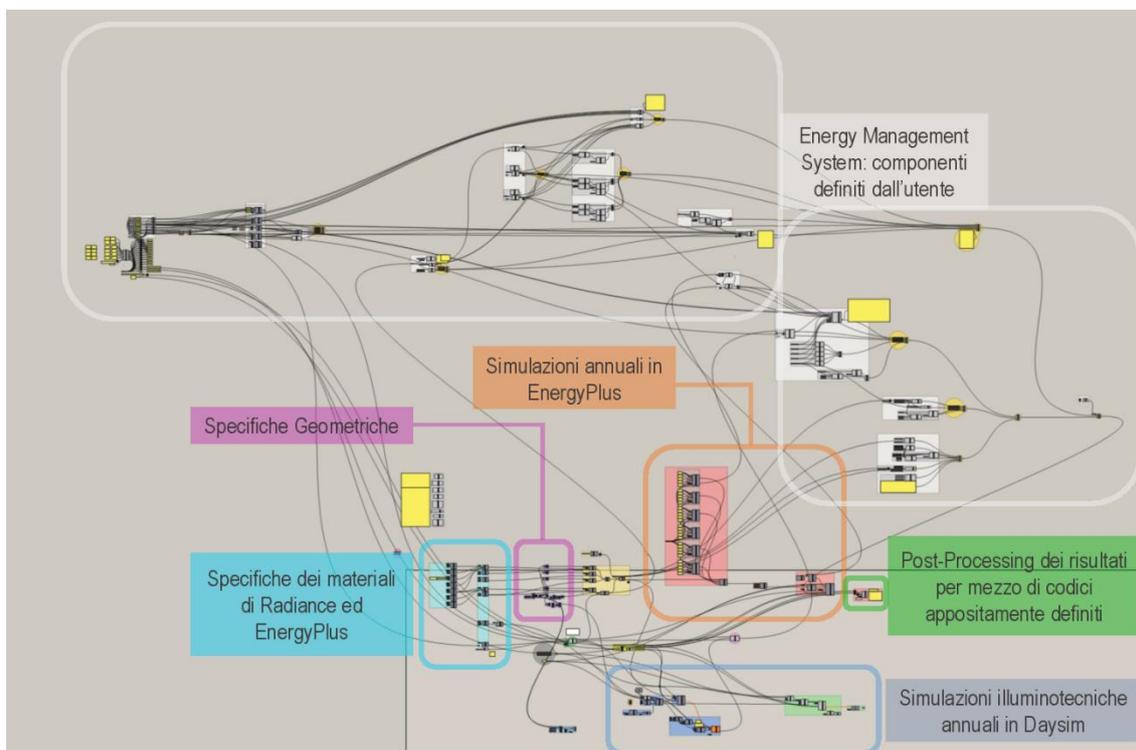
La metodologia di simulazione integrata proposta è stata sviluppata servendosi di una serie di software, più volte validati sperimentalmente, in grado di effettuare simulazioni numeriche nei domini fisici di interesse, e cioè quello illuminotecnico per il comfort visivo, e quello termico/energetico per la valutazione dei consumi energetici. Per le simulazioni di comfort visivo è stato scelto il software DAYSIM, sviluppato da Christoph Reinhart, in quanto il suo algoritmo di computazione, che sfrutta in background il motore di calcolo Radiance, utilizza il metodo di "backward raytracing", risultando quindi estremamente preciso nei risultati. DAYSIM inoltre, sfruttando il metodo dei "Daylight Coefficients", tramite il quale il cielo ed il percorso solare sono discretizzati in zone con valori di luminanza dipendenti dai dati di input provenienti da file climatici, è in grado di calcolare indici di comfort annuali relativi sia all'illuminamento sia all'abbagliamento (i due aspetti principali del comfort visivo). Per quanto riguarda invece le simulazioni

energetiche, la scelta del software da utilizzare è ricaduta su EnergyPlus, programma sviluppato dal Dipartimento di Energia statunitense (DOE). Questo software, oltre che essere plurivaldato sperimentalmente è anche estremamente versatile, offrendo all'utente la possibilità di personalizzare una grande quantità di aspetti relativi alla simulazione stessa. La ragione principale di questa scelta risiede tuttavia nella presenza, in EnergyPlus, di un modulo chiamato "Energy Management System" (EMS), il quale, tramite una programmazione dedicata effettuata mediante un linguaggio derivato dal linguaggio "Fortran" consente di personalizzare del tutto la simulazione energetica, fornendo per esempio quello che è il comportamento di un componente valutato sperimentalmente. Successivamente verrà descritto in dettaglio come questo EMS sia stato utilizzato nella metodologia qui presentata.

Si è scelto di implementare la metodologia all'interno di un ambiente che fosse il più possibile parametrico, in modo da poter facilmente svolgere una grande quantità di analisi differenti su uno stesso modello. Il software prescelto in questo caso è il plugin parametrico di Rhinoceros (software di disegno computerizzato) Grasshopper. Grasshopper è appunto un applicativo parametrico di programmazione visuale (più semplice quindi di una programmazione tramite linguaggio di programmazione vero e proprio) molto potente, il quale offre inoltre la possibilità di sfruttare per le analisi modelli geometrici costruiti facilmente tramite l'ambiente di Rhinoceros. All'interno di Grasshopper, per gestire i due programmi di simulazione sopra descritti, è stata utilizzata la molto versatile suite di add-ons LadyBug/HoneyBee, sviluppata da Mostapha Sadeghipour Roudsari. Questa suite contiene una serie di componenti tramite i quali è possibile lanciare in maniera parametrica, direttamente dall'ambiente di lavoro Grasshopper, sia le analisi annuali di comfort che quelle energetiche. Tuttavia questa suite manca della parte di EMS, che invece è presente dentro EnergyPlus, per cui i componenti necessari ad utilizzare questo modulo, così come altri componenti mancanti, sono stati scritti apposta tramite linguaggio di programmazione Python.

Il flusso di lavoro vero e proprio, che costituisce la vera novità, nonché il punto di forza di questa nuova metodologia, parte dalla definizione delle proprietà geometriche dello spazio sul quale si vuole effettuare l'analisi. Fatto ciò è necessario specificare le proprietà dei vari materiali opachi sia dal punto di vista ottico (colore, modalità e fattore di riflessione, ecc...) sia da quello termico/energetico (conducibilità e spessore dei vari strati delle pareti). È inoltre necessario specificare, per quanto riguarda i componenti trasparenti adattivi quale sia il range di variazione della loro trasmittanza nel visibile e nel solare, oltre che la variazione del loro g-value e soprattutto le proprietà di isteresi del componente (ove presenti). Inseriti questi dati l'adattività del componente viene discretizzata in una serie di stati termo-ottici statici (TOS) (il numero di stati viene definito dall'utente) per ognuno dei quali vengono effettuate simulazioni annuali complete di illuminamento orizzontale e di abbagliamento. Da questi risultati viene calcolato direttamente il consumo di energia elettrica per l'impianto di illuminazione relativamente ad ogni TOS, il quale dipende dalle caratteristiche dell'impianto stesso, specificate dall'utente prima di effettuare l'analisi. I risultati ottenuti sono quindi valori di illuminamento orizzontale, di abbagliamento e di consumo energetico per l'illuminazione relativi ad ogni istante temporale dell'anno per ogni TOS considerato. Questi dati, trattandosi di file molto pesanti, man mano che vengono elaborati sono indicizzati e conservati all'esterno dell'ambiente di Grasshopper, pronti per essere riutilizzati nelle fasi successive.

Una volta completate le simulazioni illuminotecniche i risultati relativi ad ogni TOS sono importati all'interno di energyPlus, tramite il quale è possibile svolgere l'analisi annuale energetica. All'interno di questo software esiste un modello di vetro termocromico che però, come detto, non è in grado di considerare l'isteresi del componente. È possibile superare questa limitazione scrivendo all'interno dell'EMS una serie di programmi dedicati che costituiscono de facto un nuovo modello numerico per il componente termocromico. Questi programmi sono in grado, utilizzando come dati di input la caratterizzazione del componente effettuata sperimentalmente, di simularne il comportamento dinamico tenendo in considerazione finalmente anche l'effetto dell'isteresi. Semplificando è possibile dire che viene innanzitutto calcolata la temperatura superficiale del componente che, come visto nelle precedenti sezioni, costituisce il driver di cambiamento delle sue proprietà termo-ottiche. A partire da questo dato, simulando un ciclo di isteresi basato su dati reali è possibile trovare, valutando se negli istanti precedenti a quello considerato il componente fosse in fase di "heating" o di "cooling", la sua trasmittanza nel visibile e nel solare. Ottenuti questi valori è possibile associare lo stato del vetro ad uno dei TOS in cui si era discretizzato a priori il suo comportamento. A questo punto è infine possibile, a partire dalle sue proprietà termo-ottiche, calcolare i consumi energetici per il riscaldamento o per il raffrescamento per l'istante temporale preso in considerazione. Grazie alle simulazioni illuminotecniche effettuate in precedenza è inoltre possibile associare il TOS assunto dal vetro ad un consumo energetico istantaneo per l'illuminazione relativo all'istante temporale considerato. Questa complessa operazione viene effettuata progressivamente per ognuno degli istanti temporali in cui si è scelto di discretizzare l'anno, ottenendo infine come risultati gli indici di prestazione energetica annuale per il riscaldamento (EP<sub>h</sub>), per il raffrescamento (EP<sub>c</sub>) e per l'illuminazione (EPI), oltre che l'elenco dei TOS assunti dal componente in ogni istante temporale considerato. A partire proprio da questo elenco, tramite un componente di Grasshopper scritto in Python, è possibile infine associare ad ogni istante temporale, nel quale il componente adattivo ha assunto un preciso TOS, i rispettivi risultati illuminotecnici provenienti dal database precedentemente calcolato ed indicizzato. Noti infine tutti i valori di illuminamento orizzontale ed abbagliamento per ogni momento dell'anno è possibile calcolare tutti gli indici di comfort visivo annuale.



**Figura 10 – Stralcio dell'algorithm di Grasshopper nel quale è implementata la metodologia di simulazione integrata proposta.**

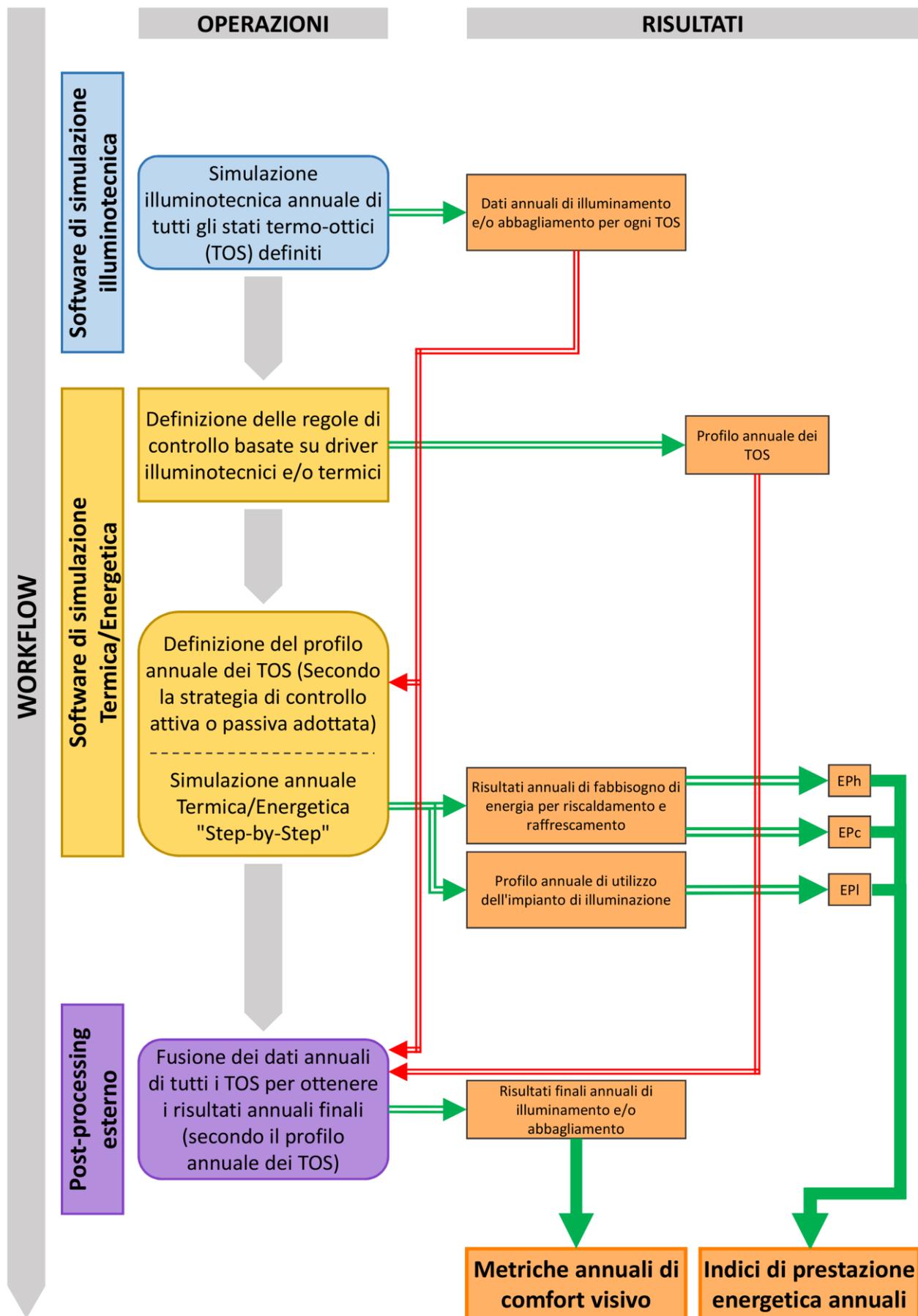


Figura 11 – Schematizzazione del workflow utilizzato nella metodologia di simulazione integrata proposta

## 5.2 Considerazioni

Come si evince dalla metodologia descritta in precedenza, il suo punto di forza principale consiste nell'essere in grado di cambiare il paradigma simulativo a cui tutti i software correntemente sul mercato fanno riferimento, e cioè il calcolare performance annuali di componenti adattivi come somma di stati termo-ottici statici uniti a posteriori. La metodologia qui proposta si basa invece su un algoritmo di computazione "step-by-step" che effettua la computazione energetica ad ogni singolo istante dell'anno, ed in base ai risultati ottenuti assegna al componente uno stato termo-ottico, calcolandone immediatamente gli effetti istantanei sui consumi energetici. Solamente dopo aver terminato l'analisi e la computazione relativa ad un singolo istante temporale si muove all'istante successivo, ripetendo per quest'ultimo la stessa operazione. Ciò consente innanzi tutto di tenere in considerazione la storia termica dell'ambiente preso in esame, calcolando quindi i consumi energetici in maniera più precisa. Inoltre, come visto, è possibile considerare nella simulazione fenomeni fisici complessi, di cui proprio l'isteresi rappresenta un esempio. Per quanto riguarda i risultati di comfort visivo, questi ultimi sono ancora calcolati a posteriori come unione di serie di stati termo-ottici statici, questo perché in campo illuminotecnico tale operazione non costituisce in alcun modo fonte di inaccuratezza.

La scelta di implementare la metodologia in un ambiente di lavoro totalmente parametrico fa sì che ogni singola parte dell'algoritmo di Grasshopper possa diventare oggetto di studio ed ottimizzazione. Questo significa che, oltre che valutare gli effetti di un componente adattivo sull'ambito energetico e di comfort, è anche possibile, fissati i risultati che si vogliono ottenere, studiare quali siano i parametri del componente analizzato o dell'ambiente preso in esame ideali per raggiungere tale scopo. Tutto ciò rende il metodo proposto estremamente potente e versatile, in quanto può essere utilizzato sia per valutare scelte progettuali che per determinare parametri ottimali relativi alle caratteristiche dell'ambiente o del componente adattivo stesso.

La metodologia di simulazione integrata, per il modo in cui essa è stata strutturata, implica un aspetto da cui essa non può necessariamente prescindere, e cioè la qualità dei dati di input. Dalla spiegazione dei vari passaggi di cui il metodo si compone risulta evidente come esso sia estremamente complesso e strutturato. Per giungere ai risultati annuali sono necessari un gran numero di passaggi intermedi, ciascuno dei quali richiede uno sforzo ed un tempo computazionale non trascurabile. È inoltre necessario sottolineare ancora una volta come la metodologia proposta si ponga come obiettivo quello di riuscire a risolvere alcune problematiche presenti nelle metodologie attualmente disponibili, problematiche che inevitabilmente si traducono in un alto grado di incertezza nei risultati annuali finali. Essendo questo l'obiettivo dichiarato per cui questa nuova metodologia nasce, ed essendo i tempi computazionali non irrilevanti, appare chiara l'importanza di disporre di dati di input relativi al comportamento del componente adattivo il più precisi e dettagliati possibile. Infatti effettuare una simulazione integrata a partire da dati di input poco precisi significherebbe sì eliminare l'incertezza dovuta alla metodologia di computazione, ma anche aggiungere ai risultati un nuovo grado di imprecisione dovuto all'incertezza presente proprio sui dati di input, vanificando così lo sforzo compiuto a livello metodologico e computazionale. Per questo motivo è auspicabile, laddove possibile, utilizzare dati provenienti da una caratterizzazione sperimentale effettuata sul componente oggetto di studio, in quanto, se essa è effettuata adottando tutti gli accorgimenti necessari, consente di ottenere dati di input con un grado di precisione adeguato per questa metodologia.

## 5.3 Caso Studio

La nuova metodologia di simulazione integrata qui presentata, una volta messa a punto, è stata applicata ad una serie di casi studio significativi al fine di valutare sia il corretto funzionamento di quest'ultima, sia gli effetti del vetro termocromico sulla prestazione energetica e sul comfort visivo relativi ad un ambiente.

L'ambiente scelto per l'analisi è rappresentato da un ufficio cellulare largo 3,6 m, alto 2,7 m e largo 4,5 m. È presente in ambiente una sola finestra, posizionata su una delle due pareti corte dell'ufficio ad un'altezza dal pavimento di 1 m. Questa è larga 3,3 m e alta 1,5 m, per un Window-to-Wall Ratio (WWR) pari al 50,9%. La finestra è stata considerata come libera da ostruzioni esterne ed orientata verso Sud.

Per quanto riguarda le proprietà ottiche delle superfici interne, queste sono state assegnate in modo da garantire all'osservatore una luminanza crescente muovendosi dal basso verso l'alto. Nello specifico, al

pavimento è stato attribuito un fattore di riflessione pari a 35%, per le pareti verticali il fattore di riflessione è stato posto uguale a 65%, per il soffitto questo è stato assegnato pari a 80% mentre per il terreno esterno è stato posto pari a 20%. Tutti quanti i materiali sono stati assunti con proprietà di riflessione perfettamente lambertiane.

Relativamente alle specifiche energetiche invece, ogni parete dell'ufficio, ad eccezione di quella che ospita la finestra, è stata considerata adiacente ad un altro ambiente climatizzato, e quindi adiabatica. Alla parete ospitante la finestra, confinante con l'ambiente esterno, è stata assegnata una stratigrafia tale da avere una trasmittanza termica pari a  $0.24 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , soddisfacente cioè le più recenti normative europee in materia. Come componente vetrato è stato considerato un vetrocamera con montati sul lato interno un vetro chiaro di spessore 6 mm (Trasmittanza visiva = 89%) e sul lato esterno il vetro termocromico, al quale è stato applicato un coating basso-emissivo sulla faccia adiacente all'intercapedine. Quest'ultima, spessa 16 mm, è stata considerata come riempita al 90% da argon. La trasmittanza termica complessiva del componente vetrato è risultata essere  $1,1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Le variazioni limite delle proprietà termo-ottiche del vetro termocromico (TC) considerate per questo studio sono riportate nella tabella seguente.

Proprietà termo-ottica	Proprietà termo-ottiche del vetro TC nel suo stato più scuro	Proprietà termo-ottiche del vetro TC nel suo stato più chiaro
Fattore di trasmissione nel visibile ( $\tau_v$ )	65,2 %	36,9 %
Fattore di riflessione nel visibile ( $\rho_v$ )	4,9 %	3,7 %
Fattore di trasmissione nel solare ( $\tau_s$ )	39,3 %	24,6 %
Fattore di riflessione nel solare ( $\rho_s$ )	2,9 %	2,5 %

**Tabella 5 - Proprietà termo-ottiche limite del vetro termocromico**

Ai fini della simulazione i range di variazione delle proprietà termo-ottiche riportati sopra sono stati discretizzati in dieci stati termo-ottici statici distanziati l'uno dall'altro da un'ampiezza costante, pari ad 1/9 dell'ampiezza totale del range di variazione.

I parametri di input per caratterizzare energeticamente il modello utilizzati in questo studio sono derivati direttamente dalle linee guida specificate nello standard ASHRAE 90.1-2007 relativamente ad un ufficio cellulare. La tabella seguente contiene i parametri ed i rispettivi valori assunti nella presente analisi.

Parametro	Unità di misura	Valore
Apporti interni dovuti alle apparecchiature	$[\text{W} / \text{m}^2_{\text{pavimento}}]$	1,25
Tasso di infiltrazione	$[\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2_{\text{pavimento}})]$	0.0005
Potenza installata per l'illuminazione	$[\text{W} / \text{m}^2]$	12
Occupanti	$[\text{persone} / \text{m}^2]$	0.12346
$U_{\text{tot}}$	$[\text{W} / (\text{m}^2_{\text{pavimento}} \cdot \text{K})]$	0.7716
Ventilazione	$[\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2_{\text{pavimento}})]$	0.000762

**Tabella 6 - Parametri di input relativi all'ambiente interno utilizzati nel modello numerico**

Con il termine  $U_{\text{tot}}$  si intende la trasmittanza termica totale della parete disperdente, calcolata come media delle trasmittanze termiche della superficie opaca e di quella trasparente, pesata sulle aree delle rispettive superfici. Una volta calcolata questa è stata aumentata del 15% rispetto al valore iniziale in modo da simulare anche l'influenza dei ponti termici. Il profilo di occupazione considerato per l'ufficio cellulare preso in esame deriva anch'esso dalle linee guida fornite dall'ASHRAE: l'ufficio è stato considerato come occupato dal lunedì al venerdì, dalle 6:00 alle 17:00 senza interruzioni per pausa pranzo o altre pause durante l'orario lavorativo. Nei fine settimana, e cioè il sabato e la domenica, l'ufficio è stato considerato come non occupato.

Il caso studio appena presentato è stato posizionato in tre diverse località, Abu Dhabi, negli Emirati Arabi Uniti (N 63° 10', E 14° 30'), Torino, in Italia (N 45° 13', E 7° 39'), ed Östersund, in Svezia (N 24° 25', E 54° 39'). Queste località sono state scelte poichè presentano caratteristiche climatiche molto diverse tra loro, in quanto Abu Dhabi è caratterizzata da un clima arido e desertico, Torino da un clima moderatamente

continentale mentre Östersund presenta un clima freddo e temperato. Inoltre queste tre località presentano una differenza di latitudine pressoché costante (circa 20°).

Per ognuna di queste tre località il modello di ufficio cellulare è stato simulato tramite il metodo di simulazione integrata presentato in questo studio utilizzando come componente trasparente sia il vetro termocromico, sia un vetro selettivo basso-emissivo con fattore di trasmissione luminosa pari a 66% e fattore di riflessione luminosa pari a 15%. Questa operazione è stata effettuata per poter valutare, nei differenti climi esaminati, la performance annuale del componente adattivo, dal punto di vista del comfort visivo e della prestazione energetica, rispetto a quella che si otterrebbe utilizzando un componente trasparente tradizionale come è appunto un vetro selettivo.

Una volta effettuato questo studio preliminare si è passati a studiare l'effetto dell'isteresi del vetro termocromico sulla prestazione energetica e sul comfort visivo annuali. Per fare ciò si è deciso di variare l'ampiezza dell'isteresi assumendola pari a 0°C, 5°C, 10°C, 20°C, 30°C. Gli altri parametri relativi al comportamento del componente adattivo, come il range di trasmittanza nel visibile e nel solare oppure la pendenza dell'isteresi non sono stati invece modificati. Il caso studio con isteresi a 0°C si comporta de facto come il modello di vetro termocromico già implementato in EnergyPlus, per cui da questa analisi è anche possibile valutare quale sia l'errore commesso da questo modello, il quale, come detto, non tiene in considerazione l'isteresi del componente. Il caso studio con isteresi pari a 5°C rappresenta l'isteresi misurata sperimentalmente, mentre gli altri casi studio fanno riferimento ad ampiezze di isteresi teoriche che il materiale potrebbe presentare.

#### 5.4 Risultati

Le analisi effettuate sui vari scenari esposti nel paragrafo precedente fanno riferimento ad un arco temporale di un anno. Per analizzare i risultati si è quindi scelto di utilizzare indici in grado di esprimere gli effetti annuali del componente sull'ambiente preso in esame, sia per la prestazione energetica sia per il comfort visivo.

Per quanto riguarda la prestazione energetica si è scelto di esprimerla mediante una serie di indici chiamati appunto "indici di prestazione energetica" (EP). Questi indici fanno riferimento al consumo annuale di energia riferita alla superficie utile di pavimento dell'ambiente considerato, e pertanto vengono espressi in kWh / (m<sup>2</sup> · anno). Esistono più indici di prestazione energetica, che fanno riferimento al consumo di energia rispettivamente per il riscaldamento invernale (EP<sub>h</sub>), il raffrescamento estivo (EP<sub>c</sub>) e per l'illuminazione (EPI). Per questa analisi, essendo il caso studio un ufficio cellulare, l'influenza del consumo di energia per acqua calda sanitaria è stato considerato come trascurabile, pertanto la somma dei tre indici appena esposti dà come risultato l'indice di prestazione energetica globale (EP<sub>gl</sub>) dell'ambiente considerato.

Per quanto riguarda invece il comfort visivo, quest'ultimo è caratterizzato principalmente da due componenti distinte, l'illuminamento sul piano orizzontale necessario a svolgere un determinato compito visivo e la condizione di abbagliamento nel campo visivo. Per quanto riguarda l'illuminamento sul piano orizzontale, si è scelto di valutare quest'ultimo mediante una metrica chiamata "Useful Daylight Illuminance" (UDI), e cioè "Quantità utile di luce naturale", introdotta da John Mardaljevic. Questo indice definisce appunto un intervallo all'interno del quale la luce naturale risulta utile per svolgere un compito visivo, compreso tra 100 lux e 2500 lux. Se un valore di illuminamento si trova all'interno di questo intervallo allora quest'ultimo è considerato come utile, se si trova al di sotto del limite minimo, allora la quantità di luce viene considerata insufficiente, mentre se si trova al di sopra del limite massimo di 2500 lux, la luce naturale viene considerata come potenzialmente abbagliante. La metrica qui presentata ha un carattere annuale ed è composta da 3 indici distinti, i quali indicano rispettivamente la percentuale di ore durante il periodo di occupazione dell'edificio in cui l'illuminamento sul piano orizzontale si trova al di sopra (UDI exceeded), al di sotto (UDI fellshort) oppure all'interno (UDI combined) dei valori limite di 100 lx e 2500 lx.

Per quanto riguarda invece la valutazione delle condizioni di abbagliamento all'interno del campo visivo, si è scelto di valutare quest'ultimo aspetto mediante una metrica chiamata "Daylight Glare Probability" (DGP), introdotta da Jan Wienold e Jens Christoffersen. Questo indice esprime la percentuale di persone

non soddisfatte dalle condizioni di illuminazione naturale di un ambiente. Mediante un'estensiva campagna di valutazione sperimentale è stata trovata la seguente relazione tra sensazione di abbagliamento e DGP.

Condizione di abbagliamento	Valore di DGP
abbagliamento impercettibile	DGP < 35%
Abbagliamento percettibile	35% ≤ DGP < 40%
Abbagliamento fastidioso	40% ≤ DGP < 45%
Abbagliamento intollerabile	DGP ≥ 45%

**Tabella 7 - Classi di percezione dell'abbagliamento con relativi valori limite di DGP**

Il DGP è stato calcolato per un punto posto ad una distanza di 1,5 m dalla finestra ed equidistante dalle due pareti laterali dell'ufficio cellulare. Il punto è stato posizionato ad un'altezza dal pavimento di 1,2 m, in modo da simulare l'altezza dell'occhio di una persona seduta ad una scrivania, mentre la direzione di osservazione presa in esame è quella perpendicolare alla finestra. È stata scelta questa direzione di osservazione poiché essa rappresenta la peggior condizione possibile per l'abbagliamento relativamente al tipo di ambiente preso in esame; è quindi possibile affermare che per qualsiasi altra direzione di osservazione la sensazione sarà migliore o al limite uguale a quella valutata per il campo visivo considerato. Il DGP è stato valutato per ogni istante temporale dell'anno, esprimendo poi come risultato finale la percentuale di ore, rispetto al profilo di occupazione dell'edificio, per cui la condizione di abbagliamento rilevata risulta essere di abbagliamento impercettibile, abbagliamento percettibile, abbagliamento fastidioso ed abbagliamento intollerabile.

#### 5.4.1 Confronto tra vetro termocromico e vetro selettivo

##### *Prestazione energetica*

I risultati relativi agli indici di prestazione energetica annuale per il riscaldamento invernale, per il raffrescamento estivo e per l'illuminazione, relativamente ai tre climi presi in esame, mostrano come la prestazione del termocromico, rispetto a quella del vetro selettivo utilizzato come riferimento, possa essere vantaggiosa o svantaggiosa proprio a seconda della localizzazione geografica. Infatti per il caso di Abu Dhabi si vede come per il componente termocromico sia necessaria una maggiore quantità di energia annua rispetto al vetro selettivo statico. Lo stesso accade per il caso di Torino, per il quale però la differenza di energia in termini assoluti risulta minore rispetto a quella registrata per il caso di Abu Dhabi. Per il Östersund invece si registra un'inversione di tendenza, infatti il termocromico permette di ridurre i consumi di energia rispetto a quelli relativi al vetro selettivo. In generale ciò che si evince dall'analisi di questi risultati è come il componente termocromico sia in grado di ridurre i consumi energetici relativi al riscaldamento invernale, mentre per quanto riguarda il raffrescamento estivo esso necessita di una quantità di energia maggiore rispetto al vetro selettivo. È inoltre importante sottolineare come i consumi relativi all'impianto di illuminazione non siano influenzati dalla variazione delle proprietà termo-ottiche del vetro termocromico, risultando uguali per questi casi studio e per quelli relativi al vetro selettivo. Queste considerazioni sono valide per ognuno dei tre climi presi in esame, sebbene poi le variazioni registrate in ciascuno di essi variano a seconda che nel clima considerato sia prevalente la componente di riscaldamento o di raffrescamento

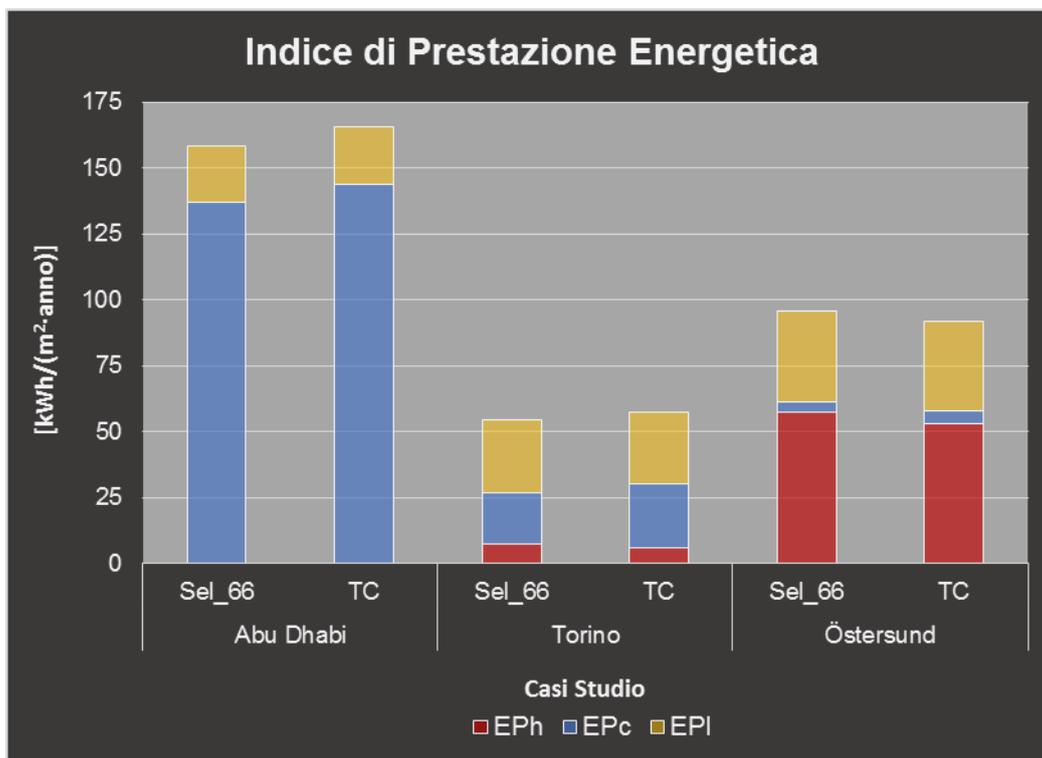
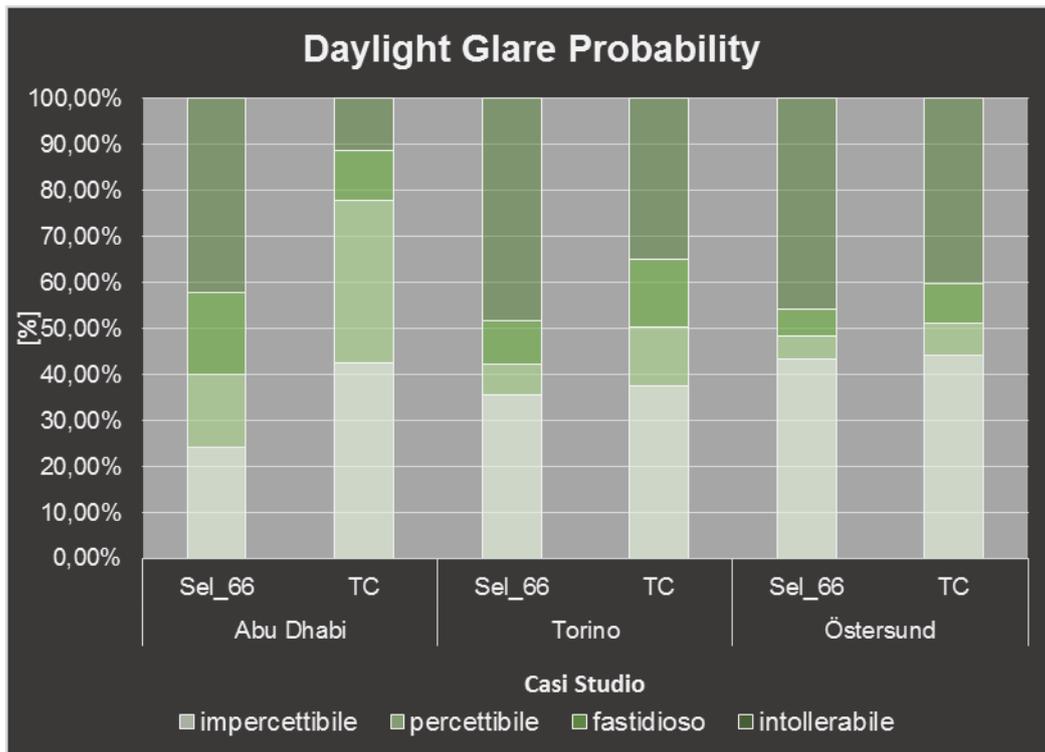


Figura 12 - Confronto tra la prestazione energetica del vetro termocromico e quella del vetro selettivo, relativamente ai tre climi presi in esame

### Comfort visivo – Abbagliamento

Analizzando i risultati relativi alle condizioni di abbagliamento ci si rende conto di come il comportamento del vetro termocromico sia opposto rispetto a quello registrato analizzando la prestazione energetica. Infatti appare subito chiaro come esso fornisca prestazioni migliori alle latitudini più basse. In generale è possibile dire che l'uso del componente adattivo analizzato in questo studio permette, a tutte le latitudini analizzate, di migliorare il comfort visivo rispetto a quello fornito dall'uso del vetro selettivo. A latitudini più basse, quindi per climi più caldi e con una radiazione solare maggiore, si nota un miglioramento del comfort visivo sensibilmente maggiore. La variazione maggiore si registra quindi per la città di Abu Dhabi, dove la percentuale di ore occupate durante l'anno in cui l'abbagliamento è intollerabile diminuisce di circa il 30%, mentre le ore occupate in cui l'abbagliamento è impercettibile aumentano del 20%. Per il caso di Torino è possibile apprezzare la stessa tendenza, ma con variazioni assolute decisamente minori. Infatti la percentuale di ore occupate in cui l'abbagliamento registrato è intollerabile diminuisce di circa il 10%, mentre la quantità di ore occupate durante l'anno in cui l'abbagliamento è impercettibile è pressoché la stessa per il vetro termocromico e per quello selettivo. Ad Östersund si mantiene ancora la tendenza fin qui registrata, ma con variazioni ancora inferiori rispetto al caso di Torino, con una diminuzione, passando dal vetro selettivo al termocromico, della percentuale di ore occupate in cui l'abbagliamento è intollerabile pari solamente al 5%. Anche ad Östersund la percentuale di ore occupate in cui l'abbagliamento non è presente è la stessa sia per il caso del componente termocromico che per quello del vetro selettivo.



**Figura 11 - Confronto tra la prestazione visiva, in termini di abbagliamento percepito, del vetro termocromico e quella del vetro selettivo, relativamente ai tre climi presi in esame**

#### Comfort visivo - Illuminamento orizzontale

Analizzando il secondo aspetto del comfort visivo, e cioè l'illuminamento sul piano orizzontale, si nota come le considerazioni fatte per l'analisi dei risultati di abbagliamento restino valide anche qui. Infatti anche per l'illuminamento sul piano orizzontale il vetro termocromico riesce a migliorare per tutti e tre i climi considerati, rispetto al vetro selettivo di riferimento, la quantità di luce naturale utile ammessa in ambiente. La variazione di questa quantità tra il caso del vetro termocromico e quello del vetro selettivo diminuisce all'aumentare della latitudine. Per Abu Dhabi l'aumento di luce naturale utile che si ottiene sostituendo un vetro termocromico ad uno selettivo è pari al 20%, per Torino a circa 10% mentre per Östersund solo il 5%. È importante far notare come la percentuale di ore in cui l'illuminazione naturale è insufficiente (UDI fellshort) è identica per i casi relativi al vetro selettivo ed i rispettivi casi con il vetro termocromico, pertanto, all'aumentare della luce naturale utile ciò che diminuisce è unicamente la quantità di luce naturale che potenzialmente può creare problemi di abbagliamento (UDI exceeded).

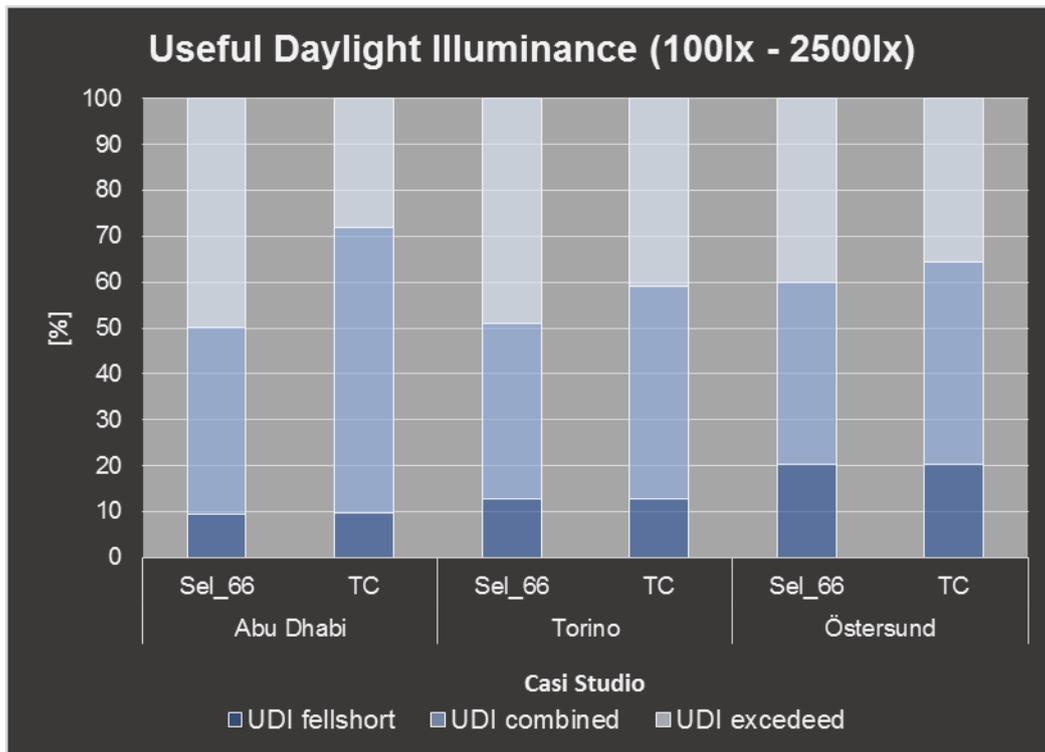
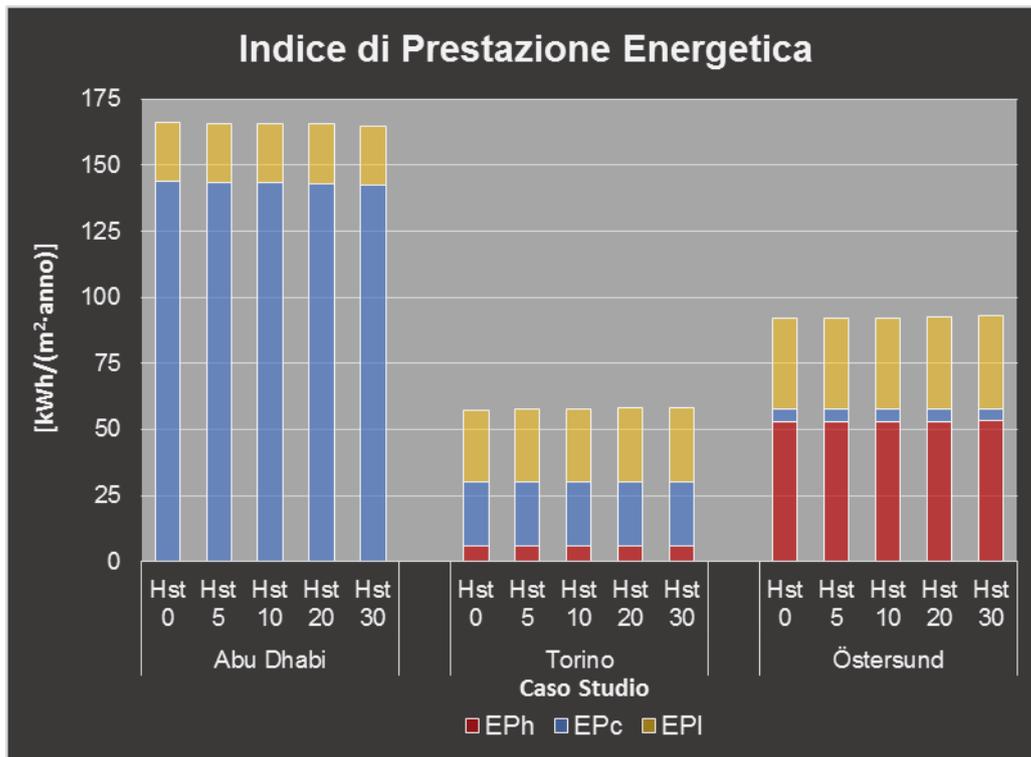


Figura 12 - Confronto tra la prestazione visiva, in termini di disponibilità di luce naturale, del vetro termocromico e quella del vetro selettivo, relativamente ai tre climi presi in esame

#### 5.4.2 Effetto della variazione dell'ampiezza dell'isteresi su prestazione energetica e comfort visivo

##### Prestazione energetica

Analizzando i risultati relativi all'effetto dell'ampiezza dell'isteresi sulla prestazione energetica ci si rende conto che quest'ultimo è pressoché nullo per tutti e tre i climi considerati. Guardando i grafici è vero che è possibile notare all'aumentare dell'ampiezza dell'isteresi una leggera diminuzione dell'E<sub>Pc</sub> ad Abu Dhabi ed un leggero aumento dell'E<sub>Ph</sub> ad Östersund, ma questa variazione è talmente piccola (sempre inferiore all'1%) che rientra all'interno del grado di incertezza del modello numerico stesso. Se ne può concludere che per qualsiasi latitudine, l'ampiezza dell'isteresi di un vetro termocromico non influenzi la prestazione energetica di un ufficio cellulare.



**Figura 13 - Confronto tra le prestazioni energetiche del vetro termocromico con differenti ampiezze di isteresi**

#### Comfort visivo - Abbagliamento

Passando invece all'analisi degli effetti dell'ampiezza dell'isteresi sul comfort visivo è possibile notare come invece in questo caso all'aumentare di quest'ultima si possano apprezzare variazioni significative. In generale è possibile affermare che all'aumentare dell'ampiezza dell'isteresi migliorano le condizioni di abbagliamento, per tutti quanti i climi analizzati. Ovviamente anche in questo caso le variazioni massime registrate sono diverse a seconda di quale clima si prenda in considerazione, andando a diminuire all'aumentare della latitudine. La variazione maggiore si registra quindi ancora una volta per Abu Dhabi, città per la quale la percentuale di ore occupate durante l'anno nelle quali l'abbagliamento è impercettibile aumenta di circa il 10% passando da un'ampiezza dell'isteresi nulla ad una di 30°C. Contestualmente la percentuale di ore occupate in cui l'abbagliamento è intollerabile diminuisce di poco più del 2%. Per Torino la variazione nella percentuale di ore occupate senza abbagliamento è inferiore, essendo circa del 6%, ma la contestuale variazione del numero di ore occupate con abbagliamento intollerabile è maggiore rispetto ad Abu Dhabi, essendo anch'essa di circa il 6%. Per il clima di Östersund è possibile osservare lo stesso comportamento osservato già per Torino, cambia soltanto la variazione massima registrata, che è pari al 4% passando da un'ampiezza dell'isteresi di 0°C ad una di 30°C.

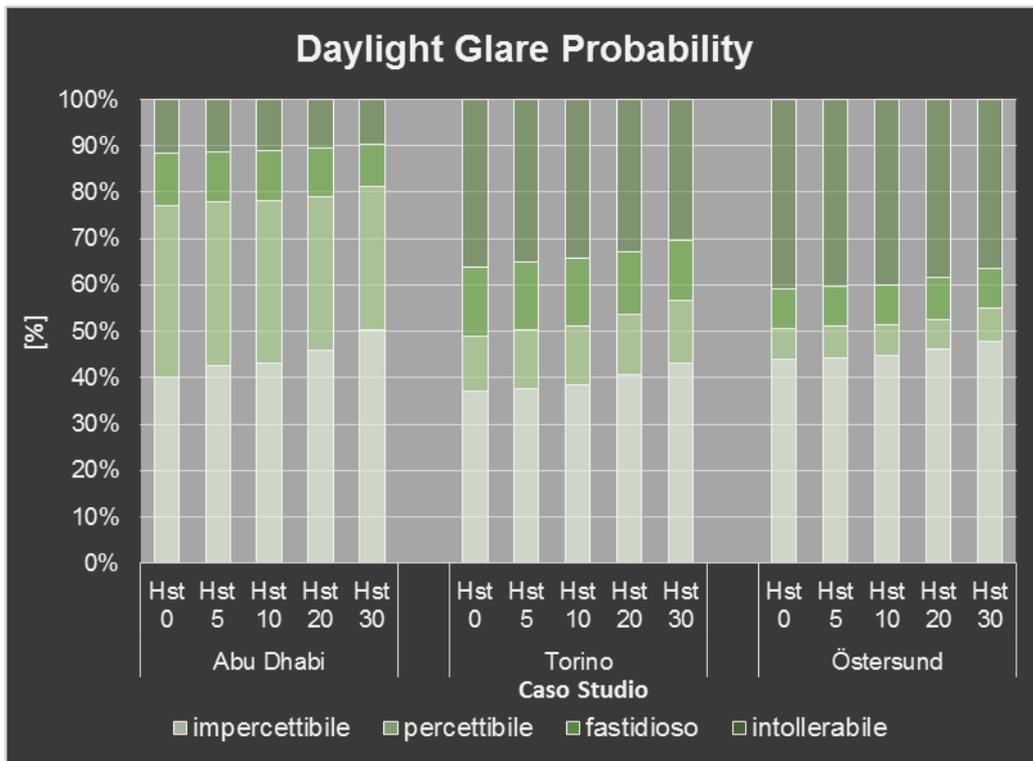
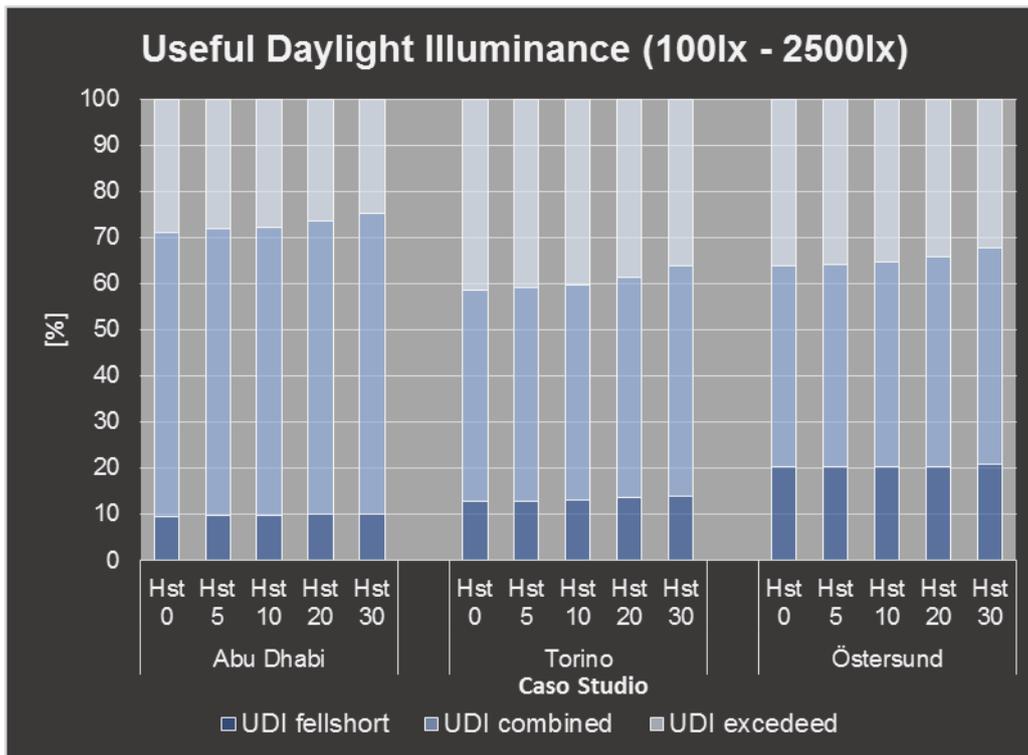


Figura 14 - Confronto tra le prestazioni visive, in termini di abbagliamento percepito, del vetro termocromico con differenti ampiezze di isteresi

*Comfort visivo - Illuminamento orizzontale*

I risultati relativi all'illuminamento orizzontale confermano quanto osservato fin ora per la prestazione energetica e per l'abbagliamento. Infatti anche qui, per tutte le latitudini analizzate, un'ampiezza di isteresi maggiore significa un miglioramento delle condizioni di comfort visivo. Per tutte e tre le latitudini, al variare dell'ampiezza dell'isteresi, la variazione osservata della percentuale di ore occupate in cui il livello di luce naturale sul piano orizzontale è considerato insufficiente è sempre al di sotto dell'1%. Quindi ancora una volta, per ogni caso studio considerato, all'aumentare della percentuale di ore in cui il livello di luce naturale è considerato come utile ciò che si riduce è il numero di ore in cui l'illuminamento orizzontale è abbagliante. In questo caso la novità è che al variare dell'ampiezza di isteresi da 0°C a 30°C, tutti i climi analizzati presentano una variazione nello UDI combined molto simile tra loro (circa 3,7% per Abu Dhabi, circa 4,3% per Torino e circa 3,3% per Östersund)



**Figura 15 - Confronto tra le prestazioni visive, in termini di disponibilità di luce naturale, del vetro termocromico con differenti ampiezze di isteresi**

### 5.4.3 Frequenza degli stati termo-ottici

Cercando di spiegare come mai un'ampiezza di isteresi maggiore sia sempre in grado di migliorare le condizioni di comfort visivo è stato effettuato uno studio delle frequenze con cui il termocromico si trova nei vari TOS per le diverse ampiezze di isteresi. Analizzando i tre grafici proposti è possibile dire che all'aumentare dell'ampiezza dell'isteresi il vetro permane più a lungo nei TOS con trasmittanza visiva più bassa. Ciò fa sì che la quantità di luce naturale che penetra all'interno dell'ambiente analizzato sia sempre ridotta. Essendo l'ambiente preso in considerazione un ufficio cellulare poco profondo (4,5 m) e con un WWR relativamente alto (50%), i problemi riscontrati dal punto di vista di comfort visivo riguardano, per tutti i climi considerati, illuminamenti troppo alti sul piano di lavoro e condizioni di abbagliamento dovute alla troppa elevata penetrazione della luce naturale in ambiente. Ecco che quindi il permanere del vetro termocromico nei suoi TOS meno trasparenti fa sì che le problematiche relative al comfort visivo appena esposte vengano in parte risolte, migliorando quindi il livello globale delle condizioni di comfort visivo.

Analizzando adesso nel dettaglio i risultati ottenuti si nota come per Abu Dhabi, dove la radiazione solare è molto intensa ed il vetro riesce quindi a raggiungere temperature molto elevate, il componente termocromico, per ampiezze di isteresi elevate (20°C e 30°C) riesca a rimanere molto a lungo nei TOS più scuri. Per Torino, dove la radiazione solare è meno intensa, ad elevate ampiezze di isteresi il vetro termocromico permane invece in TOS intermedi, lasciando quindi penetrare in ambiente una maggiore quantità di luce. Infine ad Östersund, dove il clima è freddo, i TOS in cui il componente adattivo permane per più tempo, per elevate ampiezze di isteresi, sono comunque caratterizzati da una trasmittanza nel visibile simile a quella del suo TOS più chiaro. Ciò significa che più il clima in cui il termocromico viene utilizzato è caldo, più esso sarà in grado di migliorare le condizioni di comfort visivo.

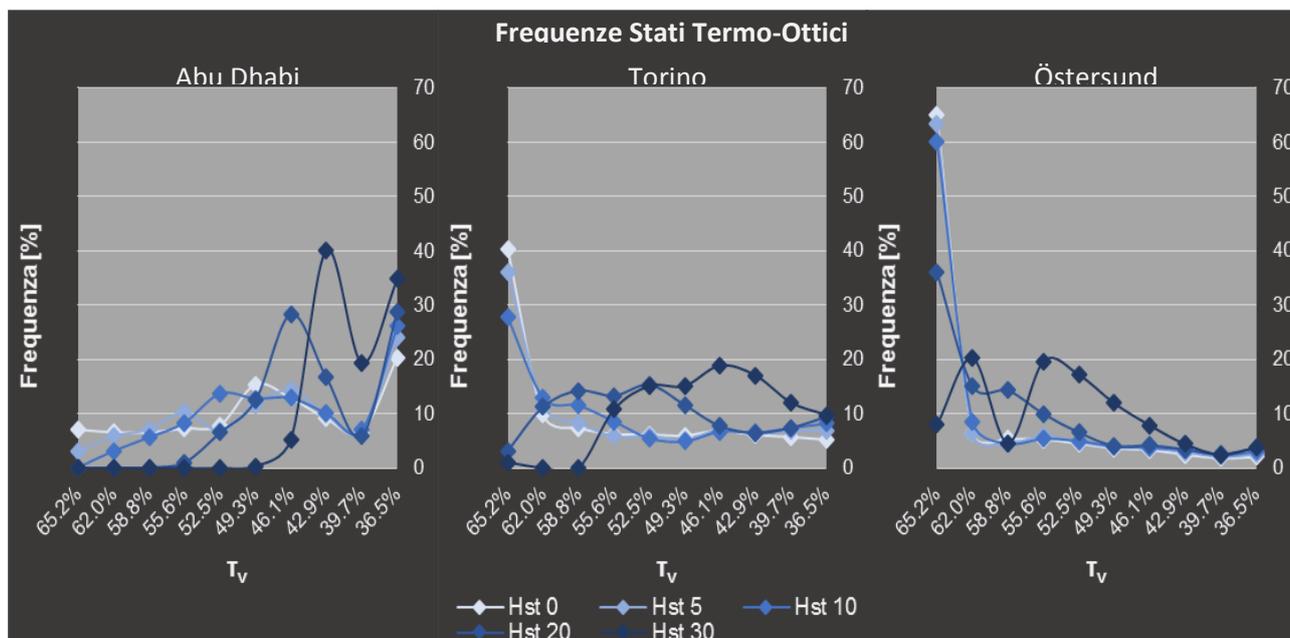


Figura 18 – Schematizzazione del workflow utilizzato nella metodologia di simulazione integrata proposta

### 5.5 Discussione

Dai risultati ottenuti emerge come il componente termocromico, rispetto ad un tradizionale vetro selettivo, implichi un maggior dispendio di energia per climi caldi ed intermedi, mentre per climi freddi quest’ultimo è in grado di migliorare, seppur di poco, la prestazione energetica di un ufficio cellulare. Dal punto di vista del comfort visivo invece, esso è in grado, per tutti i climi analizzati, di migliorare le condizioni di illuminamento orizzontale sul piano di lavoro e di abbagliamento, rispetto a quelle che si otterrebbero utilizzando il vetro selettivo. Da quanto è stato detto è possibile affermare che il componente termocromico preso in esame sia utilizzabile in climi freddi per un miglioramento della prestazione energetica. Tuttavia per questo tipo di climi le condizioni di comfort visivo presentano un miglioramento molto leggero. Nei climi intermedi invece esso può essere utilizzato appunto per il miglioramento delle condizioni di comfort visivo, in quanto non si registra un peggioramento sostanziale della prestazione energetica, a fronte però di un buon miglioramento di queste ultime. Infine per climi caldi la sua applicazione non risulta vantaggiosa in quanto è vero che si ottengono i miglioramenti più alti in ambito comfort visivo, ma è vero anche che per questi climi si registra un sostanziale peggioramento della prestazione energetica.

Per quanto riguarda invece l’influenza dell’ampiezza dell’isteresi, a tutte le latitudini analizzate, essa risulta ininfluente sulla performance energetica, mentre al suo aumentare migliorano le condizioni di comfort visivo. Ciò si verifica poiché più l’isteresi è ampia e più per il componente termocromico risulta difficile chiudere il ciclo di heating e cooling, risultando quindi in una maggiore quantità di tempo in cui quest’ultimo assume trasmittanze visive più basse. Per un caso studio come quello di un ufficio cellulare, dove la problematica maggiore per il comfort visivo è rappresentata da una troppo elevata penetrazione della luce naturale, il permanere del vetro termocromico in uno stato più scuro per più tempo riduce il livello di luce naturale in ambiente ed i problemi di comfort ad esso connessi. Ciò significa che aumentando l’ampiezza dell’isteresi del componente termocromico è possibile migliorare le condizioni di comfort visivo senza per questo andare a peggiorare la prestazione energetica globale. Questa affermazione resta vera solamente nella misura in cui i problemi di comfort visivo da risolvere siano legati ad una troppo elevata penetrazione di luce naturale. Per ambienti dove al contrario le problematiche sono legate ad una scarsa presenza di luce naturale l’applicazione di termocromici con ampie isteresi risulterebbe in un effetto opposto a quello desiderato, riducendo ancora di più la penetrazione di luce nell’ambiente interno.

## 6 Conclusione e sviluppi futuri

Le analisi sperimentali hanno dimostrato come il componente in esame sia efficacemente attivabile in funzione del regime termico cui è sottoposto. Dal punto di vista dei parametri emisferici, si evince come il

range di variazione della trasmittanza sia maggiore sullo spettro visibile che su quello solare, i rapporti di variazione tra stato chiaro e stato colorato sono rispettivamente di: 2.4 e 1.6. Da questo risultato emerge come le potenzialità sul controllo dell'abbagliamento, sul comfort visivo e sulla ottimizzazione della luce artificiale; meno efficace appare il componente per una effettiva ottimizzazione dei carichi energetici. In termini assoluti, la trasmittanza visibile varia tra 71% a 20°C e 13% a 70°C, alle stesse temperature la trasmittanza solare varia tra 65 e 29%.

Per quanto riguarda le proprietà direzionali si è osservata una significativa variazione spettrale della trasmissione che influenza la qualità della visione sia nella percezione dello spazio esterno che nell'ambiente interno. Da questo emerge una criticità dal punto di vista illuminotecnico, che potrebbe rendere il sistema non adatto, la dove sia richiesta una costanza nella percezione del colore.

Per quanto riguarda l'attività di modellazione e analisi numerica, è stato presentato un nuovo metodo di simulazione integrata che, grazie ad una logica di computazione innovativa, è in grado di tenere in considerazione i reciproci effetti che hanno il dominio termico e quello illuminotecnico l'uno sull'altro quando si ha a che fare con tecnologie di involucro trasparente adattive. La metodologia proposta, tramite un uso combinato di DAYSIM ed EnergyPlus è in grado di effettuare una computazione degli effetti del comportamento di un componente adattivo sul dominio energetico e di comfort visivo ad ogni istante temporale considerato. Ciò consente di risolvere una serie di problematiche presenti nei metodi di simulazione integrata presenti sul mercato, come il non tenere in considerazione la storia termica dell'edificio ed il non essere in grado di considerare fenomeni fisici complessi, come l'isteresi di un materiale. Questa metodologia inoltre, essendo implementata in un ambiente parametrico (Grasshopper), consente di effettuare oltre che valutazioni degli effetti dell'adattività di un componente anche ottimizzazioni sui parametri che caratterizzano gli ambienti o i materiali presi in considerazione.

I risultati ottenuti hanno consentito, oltre che di essere in grado di valutare finalmente in maniera corretta gli effetti del comportamento isteretico del materiale in esame, anche di testare la metodologia stessa su un semplice caso studio. La metodologia qui presentata è soggetta tuttavia ad una limitazione, rappresentata dal fatto che l'abbagliamento è stato calcolato per un solo punto all'interno dell'ambiente. Ciò non è del tutto rappresentativo delle condizioni di abbagliamento in altri punti della stanza, non variando quest'ultimo in maniera lineare. In futuro sarà necessario essere in grado di valutare, anche se in maniera più semplificata, le condizioni di abbagliamento per ogni punto dello spazio preso in esame.

Per quanto riguarda invece l'analisi effettuata sul componente termocromico, si è proceduto innanzi tutto a valutare la sua prestazione, per tre località geografiche rappresentative di tre climi differenti, rispetto a quella di un componente trasparente tradizionale (vetro selettivo). In seguito sono stati valutati gli effetti di differenti ampiezze di isteresi sulla prestazione energetica e sul comfort visivo fornito all'utente. I risultati mostrano come gli effetti di questo componente sulla prestazione energetica possano essere vantaggiosi o svantaggiosi a seconda del clima in cui esso viene applicato, mentre per quanto riguarda il comfort visivo la sua applicazione fornisce sempre miglioramenti, più o meno grandi, in tutti i climi considerati. Per quanto riguarda l'ampiezza dell'isteresi, essa non risulta influire sulla performance energetica, mentre al suo aumentare è invece in grado di migliorare le condizioni di comfort visivo.

Gli autori tuttavia non considerano esaustiva l'analisi qui presentata, in quanto essa è relativa solamente ad un orientamento (Sud) e ad una tipologia di ambiente (ufficio cellulare). È lecito aspettarsi che per ambienti più grandi (come per esempio un ufficio a pianta libera), in cui la problematica principale per il comfort visivo non è la troppa abbondanza, bensì la scarsità di luce naturale in ambiente, il termocromico possa non essere così performante come per il caso studio qui presentato. Per verificare questa ipotesi ed avere inoltre un'idea più generale di quali siano i vantaggi e gli svantaggi dell'utilizzo di un vetro termocromico sarà necessario estendere l'analisi a orientamenti differenti ed ambienti con caratteristiche geometriche diverse. Inoltre per lo studio qui presentato sono stati utilizzati una serie di parametri per la caratterizzazione dell'ambiente derivati dalle linee guida dell'ASHRAE 90.1-2007. Questi parametri sono stati determinati in maniera statistica e rischiano pertanto di non essere rappresentativi di condizioni reali. Sarà pertanto necessario effettuare un'analisi di sensitività su questi ultimi in modo da studiare quale sia l'effetto di ciascuno di essi sui risultati finali energetici e di comfort.

È importante infine sottolineare come questa metodologia, applicata in questo caso su un componente adattivo passivo, sia utilizzabile anche per la valutazione delle prestazioni di componenti attivi (vetri elettrocromici, vetri a cristalli liquidi, vetri fotovoltaicromici, ecc..). Infatti l'EMS all'interno di EnergyPlus consente di simulare sia il comportamento adattivo di componenti passivi, sia le strategie di controllo utilizzate per controllare componenti adattivi attivi. Risulta pertanto di estremo interesse l'applicazione della suddetta metodologia su componenti questi ultimi. In questo caso però la metodologia di simulazione integrata non verrà utilizzata solamente per valutare i risultati finali di prestazione energetica e di comfort, bensì per la valutazione e l'ottimizzazione di strategie di controllo, da applicare su questi componenti attivi, che riescano a minimizzare i consumi energetici, garantendo allo stesso tempo condizioni ottimali di comfort ambientale.

## 7 Riferimenti bibliografici

1. L. Bianco, Y. Cascone, F. Goia, M. Perino, V. Serra, "Responsive glazing systems: Characterisation methods and winter performance", *Solar Energy*, 155 (2017), pp. 372-387.
2. L. Bianco, Y. Cascone, F. Goia, M. Perino, V. Serra, "Responsive glazing systems: Characterisation methods, summer performance and implications on thermal comfort", *Solar Energy*, 158 (2017), pp. 819-836.
3. L. Bianco, F. Goia, V. Serra, M. Zinzi, "Thermal and Optical Properties of a Thermotropic Glass Pane: Laboratory and In-Field Characterization", *Energy Procedia*, 78 (2015), pp. 116-121. ISSN 1876-6102
4. L. Giovannini, F. Goia, V.R.M. Lo Verso, V. Serra, "Phase Change Materials in Glazing: Implications on Light Distribution and Visual Comfort. Preliminary Results", *Energy Procedia*, 111 (2017), pp. 357-366.
5. Maccari, M. Montecchi, F. Treppo, M. Zinzi, "CATRAM: an apparatus for the optical characterization of advanced transparent materials", *Applied Optics*, 37 (1998), pp. 5156-5161.
6. ISO 9050:2003 - Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors, ISO -International Organization for Standardization, 2003.
7. Zinzi M, Iacomussi P, G. Rossi, N. Bo, G. Scialpi. Characterization of translucent glazing units for the design and evaluation of indoor lighting. In: Intl. Conference Glass Processing,. p. CD-ROM, ISBN: 9789525836011, Tampere (2009).
8. C. Aghemo, N. Bo, Iacomussi P, S. Pezzana, G. Rossi. Constant Chromaticity environment among integrated light fulfilment. In: Proceedings of XXV CIE Session. vol. d3, p. 86-90, ISBN: 978-3-901906-21-3, San Diego (2003)
9. R.C.G.M. Loonen, F. Favoino, J.L.M. Hensen, M. Overend, "Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades", *Journal of Building Performance Simulation*, 10 (2017), pp. 205-223.
10. F. Favoino, F. Fiorito, A. Cannavale, G. Ranzi, M. Overend, "Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates", *Applied Energy*, 178 (2016), pp. 943-961.
11. M.E.A. Warwick, I. Ridley, R. Binions, "Hysteresis Width in Thermo-chromic Glazing Systems", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140 (2015), pp. 253-265.

## Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

### Giuseppe Rossi (INRIM)

Dirigente Tecnologo all'INRIM con più di 32 anni di esperienza in metrologia. Le sue principali attività di ricerca includono la fotometria, la caratterizzazione radiometrica dei materiali e degli apparecchi di illuminazione, la colorimetria e gli aspetti metrologici legati all'illuminotecnica. Ha attivamente partecipato e coordinato molti programmi di ricerca riguardanti le condizioni di visibilità stradale, la caratterizzazione degli impianti di illuminazione sul campo, la caratterizzazione di materiali diffondenti e riflettenti, tutti con

particolare attenzione agli aspetti metrologici e applicativi. Collabora in comitati normativi nazionali. In Uni è coordinatore del GL5 "Illuminazione stradale". In CIE (International Lighting Commission) è membro italiano della divisione 4 (Lighting and Signalling for Transport), è stato coordinatore del comitato TC4-26 (Systems for Measurement of Photometric Quantities of Road Lighting Installations) ed è attualmente coordinatore del TC4-50 "Road surface characterization". In INRIM ha sviluppato sistemi di misura per la caratterizzazione sul campo di impianti di illuminazione stradali e per le opere d'arte, laboratori per la misurazione della ripartizione dell'intensità luminosa di sorgenti e goniofotometri per la caratterizzazione di materiali. Dal 2004 tiene, presso l'Università di Torino, il corso di Applicazioni colorimetriche per i beni culturali (Corsi di Laurea in tecnologie e scienze per i beni culturali) e il corso di Fotometria con laboratorio (Corso di laurea in ottica e optometria).

### **Paola Iacomussi (INRIM)**

Ricercatrice con più di 18 anni di esperienza in metrologia. La sua attività di ricerca include lo studio di tecniche assolute e relative per la caratterizzazione di materiali e di sistemi di illuminazione, la realizzazione e conservazione di unità fotometriche, le applicazioni e lo studio di sistemi di misura con rivelatori ILM (Image Luminance Measuring Device), lo sviluppo di sistemi radiometrici e fotometrici per i beni culturali, lo studio delle caratteristiche dei sistemi di illuminazione con particolare attenzione agli aspetti della percezione. È ispettore tecnico Accredia per la colorimetria e per la caratterizzazione radiometrica dei materiali, membro italiano della divisione 8 (Image Technology) della CIE (International Lighting Commission) e membro del comitato tecnico della rivista LUCE dell'AIDI. Ha attivamente partecipato a programmi di ricerca nazionali ed europei sui materiali, la caratterizzazione di sorgenti luminose e sulla percezione di sistemi luminosi e di segnalazione. Dal 2004 tiene presso l'Università di Torino, il corso di Applicazioni colorimetriche per i beni culturali (Corsi di Laurea in tecnologie e scienze per i beni culturali) e il corso di Fotometria con laboratorio (Corso di laurea in ottica e optometria).

### **Valentina Serra (Politecnico di Torino)**

Laureata in Architettura, Phd in Fisica Tecnica, è attualmente professore associato di Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino. Tiene corsi di primo, secondo e terzo livello sui temi della fisica dell'edificio e delle tecniche di controllo ambientale. Supervisor di 6 tesi di dottorato. Opera all'interno del Gruppo di Ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment) costituito da 10 docenti strutturati e circa 20 giovani ricercatori, tra dottorandi, assegnisti e borsisti e coordina una specifica unità di ricerca sui temi dell'involucro edilizio avanzato. Coinvolta in numerosi progetti di ricerca nazionale ed internazionale e in contratti di consulenza e di ricerca con enti pubblici e privati, sia come ricercatore che in qualità di responsabile scientifico, la sua attività è prevalentemente indirizzata sui seguenti temi: modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale di componenti di involucro edilizio trasparente e opaco a carattere innovativo (tra i principali vetrate a doppia pelle, vetrate a prestazione variabile, schermature solari, sistemi di facciata adattivi e responsivi, Living Wall Systems e coperture a verde naturale ed artificiale, intonaci termoisolanti con aerogel, laterizi ad elevata prestazione, camini di luce); strumenti e metodi per la valutazione della sostenibilità in edilizia. Co-Referente dei laboratori per la caratterizzazione termica di materiali, componenti e sistemi edilizi (TWINS-outdoor test cells, camera climatica e piastra calda) per il Dipartimento Energia. Membro del Comitato Scientifico di Conferenze nazionali ed internazionali, è stata membro del Comitato Organizzatore di IBPC 2015 e co-chair dell'International conference SEB 2016. Attualmente è Presidente della Commissione Cultura di AiCARR. Revisore per le riviste internazionali Energy and Buildings, Building and Environment, Building Simulation, Journal of Architectural Science, Energy Efficiency, è autrice di circa 100 lavori, di cui circa la metà su riviste internazionali indicizzate (WOS and SCOPUS).

### **Luigi Giovannini (Politecnico di Torino)**

Laurea col massimo dei voti presso il Politecnico di Torino (Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città) nel 2014, discutendo una tesi dal titolo *Design of an adaptive shading system for arid climates: theoretical, numerical and experimental analyses*. Nella sua tesi magistrale, svolta al LIPID (Interdisciplinary Laboratory of Performance-Integrated Design), presso l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), in collaborazione con il Politecnico di Torino, ha ideato un nuovo sistema passivo di schermatura adattiva per climi aridi e ne ha ottimizzato le prestazioni in termini di comfort visivo e fabbisogno energetico. Nel 2015 entra nel corso di dottorato in Energetica presso il Politecnico di Torino, sviluppando un progetto di ricerca dal titolo *Transparent adaptive façades: a novel approach to optimize global energy performance and comfort for the occupants*. Il suo lavoro di ricerca è stato pubblicato su riviste internazionali ed è stato presentato in conferenze internazionali (SEB, IBPC, PLEA, NEXT-Façades). Dal 2016 collabora con il Dipartimento di Energia (DENERG) del Politecnico di Torino nell'insegnamento di corsi per la Facoltà di Architettura relativi alla progettazione illuminotecnica di sistemi di luce naturale ed alla valutazione del comfort visivo. Nel 2017 vince una borsa di studio Europea, nell'ambito della COST Action TU1403 - Adaptive Façades Network per lo svolgimento di un periodo di ricerca presso l'Università di Cambridge e presso lo studio di consulenza ingegneristica londinese Eckersley O'Callaghan.