

TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
**ARCHITETTURA COSTRUZIONE E CITTÀ**  
POLITECNICO DI TORINO



**VALUTAZIONE**  
**DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA E VISIVA**  
**DI SISTEMI TRASPARENTI ELETTROCROMICI**  
**E DI DIFFERENTI STRATEGIE DI CONTROLLO**

**CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE**  
**E**  
**SIMULAZIONI NUMERICHE**

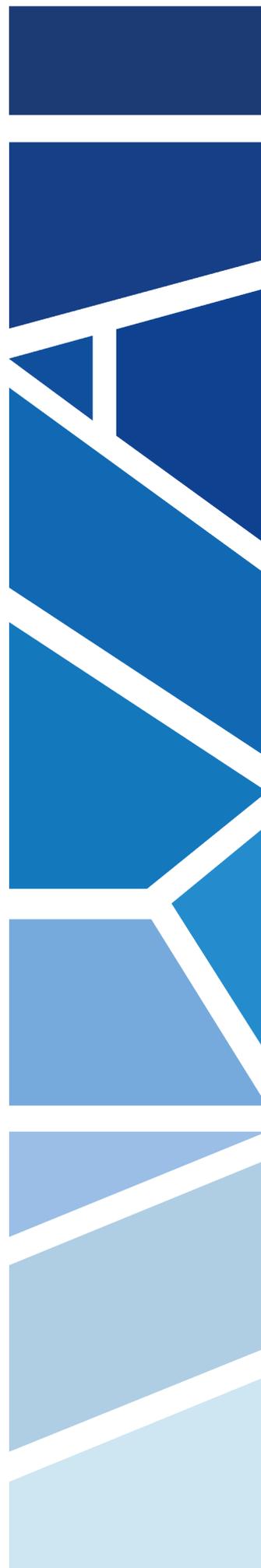
Luglio 2018

**MANUELA BARACANI**

Relatori

VALENTINA SERRA

LUIGI GIOVANNINI





“La stessa emozione, la stessa meraviglia e lo stesso mistero, nascono continuamente ogni volta che guardiamo a un problema in modo sufficientemente profondo. Mai preoccupati che la risposta ci possa deludere, con piacere e fiducia solleviamo ogni nuova pietra per trovare stranezze inimmaginabili che ci conducono verso domande e misteri ancora più meravigliosi. Certamente una grande avventura!”

*Richard Feynman*

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1 _ STATO ATTUALE LEGISLAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO</b>	<b>7</b>
1.1 NORMATIVE E LEGGI IN AMBITO ENERGETICO	8
1.2 NORMATIVA ITALIANA	10
1.3 EDIFICIO NZEB	11
1.4 INCIDENZA DELL'ENERGIA UTILIZZATA DALL'EDIFICIO SUL CONSUMO DI ENERGIA GLOBALE	12
1.5 RIPARTIZIONE DELL'ENERGIA UTILIZZATA DALL'EDIFICIO NEI DIVERSI USI	14
1.6 FABBISOGNO ENERGETICO DI UN EDIFICIO	15
1.7 POTENZIALITÀ DI UN EDIFICIO DINAMICO	18
1.8 INCIDENZA DELL'ENERGIA DISPERSA ATTRAVERSO I VARI COMPONENTI DELL'EDIFICIO	19
1.9 PRESTAZIONI E INNOVAZIONI SETTORE VETRO	20
Vetro chiaro	22
Vetro colorato	22
Vetro riflettente	23
Vetro anti-riflesso	23
Vetro autopulente	23
Vetro selettivo	23
Vetro fotovoltaico	24
Aerogel	24
Finestra con lastre multiple	25
Doppia pelle vetrata	26
Finestra ideale	27
1.10 SMART WINDOWS	28
1.10.1 TECNOLOGIE PASSIVE	29
Finestra con rivestimento in materiale a cambio di fase (PCM)	29
Vetro fotocromico	29
Vetro termotropico	30
Vetro termocromico	30
1.10.2 TECNOLOGIE ATTIVE	31
Vetrata a trasparenza variabile (SPD)	31
Vetrata a cristalli liquidi (PLDCs e ChLCs)	31
Gasocromico	32
Vetro elettrocromico	32
Vetro fotovoltaicromico	33
1.11 CRITICITÀ DELLE SMART WINDOWS	33
1.12 ALTRE APPLICAZIONI DEI VETRI CROMOGENICI	34
1.13 APPROCCIO DI RICERCA SUI VETRI CROMOGENICI E CRITICITÀ DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE	34
<b>CAPITOLO 2 _ DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE</b>	<b>37</b>
2.1 ORGANIZZAZIONE DEL SITO	38
2.2 SET UP SPERIMENTALE	38

2.3 SET UP - CARATTERIZZAZIONE DEI COMPONENTI.....	42
2.3.1 C (conduttanza) e U (trasmissione termica).....	42
2.3.2 FATTORE SOLARE.....	45
2.3.3 VERIFICA DEI VALORI DI TRASMITTANZA.....	49
2.3.4 CARATTERIZZAZIONE TERMICA.....	51
Trasmissione solare.....	52
2.3.2 CARATTERIZZAZIONE VISIVA.....	62
Trasmissione visibile.....	63
2.3.3 TEMPERATURE SUPERFICIALI ESTERNE.....	65
2.3.4 TEMPERATURE SUPERFICIALI INTERNE.....	70
2.3.5 CONFRONTO TRA TEMPERATURE SUPERFICIALI INTERNE ED ESTERNE.....	73
2.3.6 FLUSSI TERMICI.....	77
<b>CAPITOLO 3_ ANALISI DELLA LETTERATURA.....</b>	<b>78</b>
3.1 INDICI DI VALUTAZIONE.....	79
3.2 ARTICOLI SCIENTIFICI.....	83
<b>CAPITOLO 4 _ SIMULAZIONE NUMERICHE.....</b>	<b>115</b>
4.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO.....	119
4.2 ANALISI EFFETTUATE SU TORINO _ WWR 1.....	121
4.2.1 Analisi su vetri statici.....	121
4.2.2 Analisi basate su strategie di controllo ON OFF.....	125
4.2.3 Analisi basate su strategie di controllo lineari.....	129
4.2.4 Analisi basate su strategie di controllo con veneziane.....	134
4.2.5 Analisi critica dei risultati ottenuti.....	138
4.3 ANALISI EFFETTUATE SU TORINO _ WWR 0.5.....	144
4.3.1 Analisi su vetri statici.....	144
4.3.2 Analisi basate su strategie di controllo ON OFF.....	145
4.3.3 Analisi basate su strategie di controllo lineari e con veneziane.....	146
4.3.4 Analisi critica dei risultati ottenuti.....	147
4.4 ANALISI EFFETTUATE SU ABU DABHI _ WWR 1.....	149
4.4.1 Analisi su vetri statici.....	149
4.4.2 Analisi basate su strategie di controllo ON OFF.....	150
4.4.3 Analisi basate su strategie di controllo lineari e con veneziane.....	151
4.4.5 Analisi critica dei risultati ottenuti.....	152
4.5 ANALISI EFFETTUATE SU ROMA _ WWR 1.....	153
4.5.1 Analisi su vetri statici.....	153
4.5.2 Analisi basate su strategie di controllo ON OFF.....	154
4.5.3 Analisi basate su strategie di controllo lineari e con veneziane.....	155
4.5.4 Analisi critica dei risultati ottenuti.....	156
4.6 CONFRONTO TRA CITTÀ.....	159
<b>CAPITOLO 5 _ CONCLUSIONI.....</b>	<b>163</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>166</b>

## INTRODUZIONE

L'indagine sulle prestazioni in campo dei vetri cromogenici e sulle modalità ottimali per il controllo del loro funzionamento risulta essere oggetto di ricerca da anni a livello internazionale.

Obiettivo della tesi è un'analisi sperimentale e con simulazioni numeriche del comportamento di vetri cromogenici e in particolare di un sistema trasparente con lastra elettrocromica esterna e lastra basso-emissiva interna, esaminato in diversi climi e con diverse strategie di controllo basate su parametri visivi ed energetici. La tesi intende identificare le problematiche e i punti di forza dell'utilizzo di tale tecnologia paragonata alle tecnologie di vetri selettivi ad alte prestazioni e all'utilizzo di altri sistemi dinamici di ombreggiamento, quali veneziane interne ed esterne.

Il lavoro di seguito presentato si inserisce in un più ampio lavoro di ricerca affrontato dai dottorandi e ricercatori del Gruppo TEBE afferenti al Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino.

La tesi si è sviluppata a partire dall'attività sperimentale condotta sui modelli reali di tre tipi di vetro e sull'analisi e caratterizzazione termica e visiva di tali modelli reali. Essa è proseguita poi con una parte di analisi svolta attraverso simulazioni numeriche che, grazie ai dati estratti dall'attività sperimentale e all'analisi della letteratura esistente riguardante le strategie di controllo di componenti dinamici per edilizia, ha reso possibile approfondire le metodologie di controllo di vetri elettrocromici studiando le prestazioni energetiche e visive di tali sistemi applicati in un ambiente di ufficio standard. Le simulazioni sono state eseguite con l'ausilio di Rhinoceros, Diva for Rhino e Energy Plus, software di simulazione energetica e illuminotecnica.

Il lavoro si è dunque articolato in cinque passaggi fondamentali:

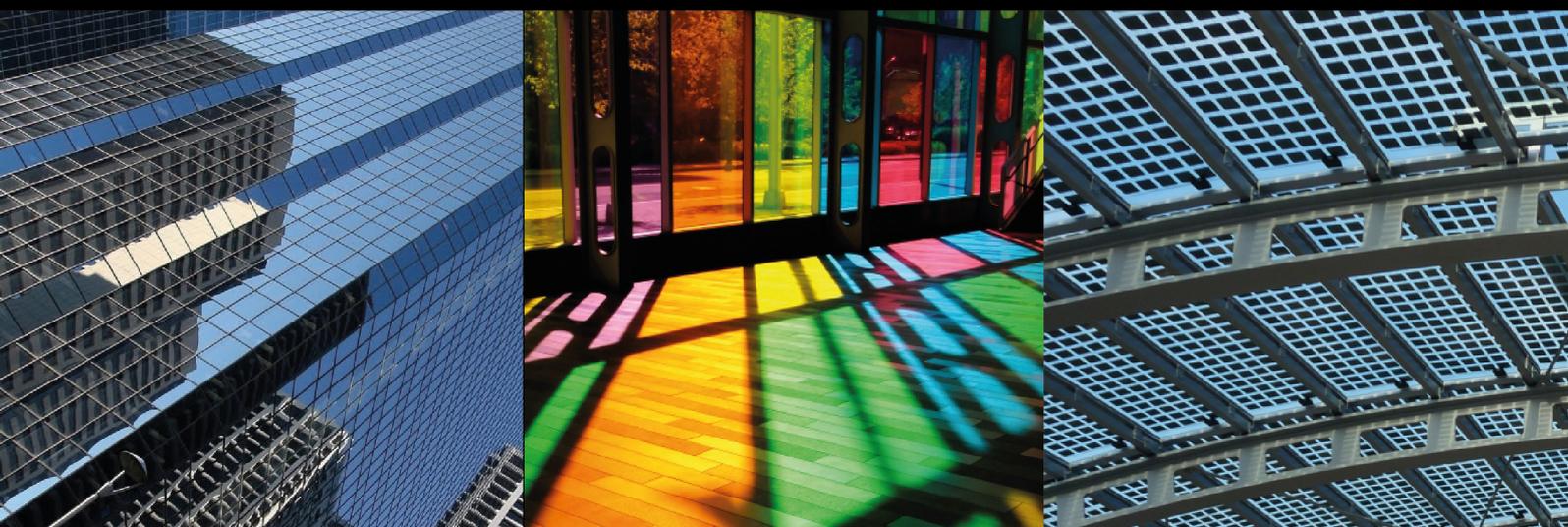
- analisi della letteratura
- set up
- misure sperimentali
- creazione del modello e simulazioni di vetri statici
- simulazione di strategie di controllo da letteratura e proprie.

L'attività sperimentale è stata condotta nella sede centrale del Politecnico di Torino, più specificatamente sul tetto del dipartimento Energia - DENERG, dove è presente l'apparato sperimentale TWINS costituito da due celle di prova a scala reale.

## CAPITOLO 1

### STATO ATTUALE DELLA LEGISLAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO

La ricerca e la sperimentazione nel campo dei sistemi trasparenti cromogenici, che ha acquisito vigore negli ultimi trent'anni nel campo dell'edilizia, è stata ed è attualmente stimolata dalle politiche energetiche e ambientali che si stanno affermando a livello internazionale. A partire dagli anni '90 si è cominciato a porre l'attenzione sul tema della sostenibilità e sugli aspetti di efficienza energetica, risparmio energetico e riduzione di emissioni, nonché sull'utilizzo delle fonti rinnovabili. Elemento essenziale dello sviluppo di tale sensibilità è sicuramente l'attenzione che a livello politico-normativo viene data a tale argomento. Per contestualizzare lo sviluppo delle tecnologie che sono indagate nella tesi e avvicinarsi a una visione globale dell'argomento è utile soffermarsi sulle linee guida indicate da organismi internazionali, dalla Comunità Europea e a livello locale in tale ambito ed esaminare velocemente l'evoluzione dell'atteggiamento politico e sociale nei confronti di questi temi.



## 1.1 NORMATIVE E LEGGI IN AMBITO ENERGETICO

I primi temi che hanno suscitato l'interesse della sfera politica sono quelli connessi al consumo energetico e all'inquinamento atmosferico. In particolare dagli anni '90 gli attori politici internazionali hanno cominciato a prendere delle misure per contenere la loro crescita incontrollata.

### 1992: UNFCCC

I primi segnali che dimostrano la presa d'interesse nei confronti di tale questione risalgono al 1992, quando per la prima volta essa viene presentata come tema di attenzione a livello internazionale. Viene infatti convocata a Rio de Janeiro, la UNCED, «Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite» (*United Nations Conference on Environment and Development*). Dai lavori dei rappresentanti che ad essa partecipano viene prodotta la UNFCCC, la «Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici» (*United Nations Framework Convention on Climate Change*). Tale convenzione riveste un'importanza fondamentale innanzitutto perché produce il primo documento ufficiale che propone degli obiettivi di riduzione di inquinamento atmosferico e dunque di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. L'obiettivo dichiarato è «di stabilizzare, in conformità delle pertinenti disposizioni della Convenzione, le concentrazioni di gas ad effetto serra nell'atmosfera a un livello tale che sia «esclusa qualsiasi pericolosa interferenza delle attività umane sul sistema climatico<sup>1</sup>».

154 Nazioni firmano il trattato, che entra in vigore in data 21 marzo 1994.

Da tale conferenza nasce anche il Protocollo di Kyoto, definito nel 1997 e sottoscritto da 40 paesi nel 2001, che ha come obiettivo «operare una riduzione delle emissioni di elementi di inquinamento in una misura non inferiore all'8,65% rispetto alle emissioni registrate nel 1985 – considerato come anno base – nel periodo 2008-2012<sup>2</sup>». Alla riduzione di emissione di gas serra si unisce un sistema di crediti di emissione, una sorta di moneta che permette ai paesi virtuosi, che riducono oltre l'obiettivo le emissioni di gas serra, di vendere tali crediti ad altri paesi in difficoltà a ottemperare agli impegni prestabiliti.

### 2001-2008: Direttive Comunitarie

Nei primi anni 2000 la Comunità europea redige una serie di direttive che si inseriscono nell'ambito del risparmio energetico e della promozione delle fonti energetiche rinnovabili: alcune di esse coinvolgono specificatamente i temi introdotti dalla Conferenza UNFCCC, altre propongono nuove sfere di azione e di ragionamento. Di seguito si elencano alcune tra le direttive concernenti tali argomenti emesse tra 2001 e 2008 con i principali temi trattati:

**2001/77/CE** sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità

**2002/91/CE** sul rendimento energetico nell'edilizia: direttiva con cui si recepiscono le indicazioni già redatte nel protocollo di kyoto del '97. "impondeva l'obbligo ai paesi membri di sviluppare e adottare una metodologia per il calcolo dei consumi energetici degli edifici.

<sup>1</sup> Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici Conclusa a New York il 9 maggio 1992, art.2

<sup>2</sup> Protocollo di Kyoto della convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici Conclusa a New York il 9 maggio 1992, art.2

**2004/8/CE** sulla promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia

**2005/32/CE** relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia

**2006/32/CE:** concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici

## **2007: Consiglio Europeo di Bruxelles**

Il 2007 è un anno in cui gli aspetti climatici ed energetici sono più volte esaminati e discussi, a partire dalla primavera, in cui il consiglio invita all'azione per una «politica climatica ed energetica integrata<sup>3</sup>».

In particolare esso ribadisce l'impegno nella riduzione delle emissioni di gas serra, proponendo di prendere le seguenti risoluzioni:

«I paesi sviluppati dovrebbero mantenere un ruolo guida impegnandosi a ridurre collettivamente le emissioni di gas ad effetto serra dell'ordine del 30% entro il 2020 rispetto al 1990, anche nella prospettiva di ridurre collettivamente le emissioni del 60%-80% entro il 2050 rispetto al 1990<sup>4</sup>»

Inoltre:

«l'UE si impegni in modo fermo ed indipendente a realizzare una riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra di almeno il 20% entro il 2020 rispetto al 1990<sup>5</sup>»

**Direttiva Comunitaria 2009/29/CE** modifica la direttiva 2003/87/CE al fine di perfezionare ed estendere il sistema comunitario per lo scambio di quote di emissioni di gas a effetto serra.

Essa, in riferimento ai provvedimenti descritti dal consiglio Europeo nel 2007, introduce il «Piano 20 20 20», che si pone i seguenti obiettivi:

- Riduzione del 20 % delle emissioni di gas a effetto serra
- Aumento del 20 % della quota energetica prodotta da fonti rinnovabili

Il tutto entro il 2020, al fine di limitare il riscaldamento climatico globale ad un aumento massimo di temperatura di 2 °C (rispetto all'età preindustriale).

## **2010: Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo sulla prestazione energetica nell'edilizia**

La direttiva comunitaria emessa nel 2010, a sostituzione di quella del 2002, entra ancor più in profondità nei temi energetici, passando da un quadro normativo generale sulla riduzione delle emissioni a delle norme dirette mirate al campo edilizio, e anche piuttosto precise nella definizione di limiti e parametri da rispettare. In particolare:

<sup>3</sup> Conclusioni della presidenza del Consiglio Europeo di Bruxelles dell'8-9 marzo 2007, 7224/07, p. 2

<sup>4</sup> Conclusioni della presidenza del Consiglio Europeo di Bruxelles dell'8-9 marzo 2007, 7224/07 art 30

<sup>5</sup> Conclusioni della presidenza, *supra* nota 2, art 32

«Gli Stati membri adottano le misure necessarie affinché siano fissati requisiti minimi di prestazione energetica per gli elementi edilizi che fanno parte dell'involucro dell'edificio e hanno un impatto significativo sulla prestazione energetica dell'involucro dell'edificio quando sono sostituiti o rinnovati, al fine di raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi<sup>6</sup>».

Inoltre:

«Gli Stati membri provvedono affinché:

a) entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero;

b) a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero<sup>7</sup>».

Per la definizione di Edificio ad energia quasi zero (NZEB) vedere paragrafo 1.3

## 1.2 NORMATIVA ITALIANA

### Legge 373 del 30/04/1976

Per quanto riguarda l'Italia un primo passo nella normativa in ambito energetico si ha nel 1976, quando con la Legge ordinaria del Parlamento n°373 viene fissato un regolamento per la realizzazione degli impianti degli edifici e l'isolamento termico degli stessi, con l'identificazioni delle prestazioni da raggiungere obbligatoriamente nella realizzazione o ristrutturazione di un edificio.

### LEGGE 9 gennaio 1991, n. 10

Norme in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.

Tale legge è volta a stimolare la riduzione dei consumi di energia e incentivare l'utilizzo delle fonti rinnovabili. Vengono previsti per la prima volta i contributi per coloro che agiscono in tale direzione.

### 2008: norma UNI/TS 11300

Nel 2008 entra in vigore una delle norme fondamentali come riferimento energetico riguardante il calcolo della prestazione energetica degli edifici. Essa identifica un metodo univoco per le valutazioni energetiche.

### 2014: norma UNI/TS 11300-1

Sostituisce la norma uni 2008 e regola il procedimento per la "Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale". Essa è la normativa ancora di riferimento in questo campo.

---

<sup>6</sup> Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia, [2010] G.U. L 153/13, art. 1

<sup>7</sup> Direttiva 2010/31/UE, *supra* nota 6, art. 9

## 2015: Legge Italiana 9-91 rettificata da decreto MISE

Lo Stato Italiano recepisce le indicazioni della Comunità Europea, e nello specifico della Direttiva Europea Edifici a Energia Quasi Zero (NZEB), e le formalizza grazie al “Decreto Requisiti Minimi” applicato alla legge 9-91, in vigore dal 1 ottobre 2015. Esso fissa i metodi di calcolo e i requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche per gli edifici di nuova costruzione e per le ristrutturazioni, e introduce l’obbligo per cui dal 31 dicembre 2020 (31 dicembre 2018 per i nuovi edifici pubblici) tutti gli edifici di nuova costruzione debbano essere NZEB.

### 1.3 EDIFICIO NZEB

#### Definizione di Edificio a energia quasi zero

La definizione “Edificio a energia quasi zero” (Near Zero Energy Building, NZEB) indica un edificio con altissima prestazione energetica, che unisce un fabbisogno energetico molto basso, raggiunto grazie alle prestazioni dell’involucro edilizio e dei dispositivi interni, alla copertura dello stesso grazie all’utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, se possibile localizzate nelle vicinanze dell’edificio. Per ridurre il fabbisogno energetico di un edificio, come sottolineato da Wu, Skye, Domanski<sup>8</sup> occorre perfezionare la progettazione dell’edificio accrescendo l’isolamento termico e la tenuta all’aria e ottimizzando forma (un edificio compatto disperde meno), orientamento, ombreggiamento e uso della vegetazione, quando possibile. Inoltre occorre aumentare l’efficienza energetica degli apparecchi e dei dispositivi interni all’edificio, a partire dal sistema di illuminazione agli elettrodomestici; in tal modo si diminuisce il consumo diretto di elettricità dalla rete e si diminuisce il carico di raffrescamento estivo dovuto al riscaldamento degli stessi apparecchi. Elemento fondamentale della progettazione risulta anche la scelta degli impianti di riscaldamento, ventilazione e climatizzazione. Non solo è necessario adottare impianti ad alta efficienza energetica, ma anche servirsi di alcuni accorgimenti quali il preriscaldamento dell’aria di ventilazione. Per conseguire tale obiettivo è buona norma servirsi di impianti di recupero di calore e impianti geotermici. L’associazione degli impianti e dei dispositivi domestici a un impianto domotico può permettere l’ottimizzazione del funzionamento degli stessi. Tuttavia un elemento fondamentale, ma non preventivabile, per il corretto funzionamento di un edificio NZEB risulta essere il comportamento degli occupanti. Oggetto di numerosi studi degli ultimi anni, è quasi certo che tale fattore influisca sul consumo energetico contribuendo a creare un “*energy-performance gap*”.

#### Energy performance gap

Esso consiste nella differenza tra il consumo di energia calcolato nella fase di progetto e quello che realmente viene misurato nell’edificio in funzione. Vi possono essere diverse spiegazioni a tale fenomeno: errori costruttivi, un errato utilizzo degli apparecchi domestici e degli impianti, un’eccessiva semplificazione dei modelli di calcolo in fase di progetto e non ultimo il comportamento degli occupanti.<sup>9</sup>

Benché ancora la mancanza di dati e informazioni non permetta di identificare le precise cause

<sup>8</sup> Wei Wu, Harrison M. Skye, Piotr A. Domanski, *Selecting HVAC systems to achieve comfortable and cost-effective residential net-zero energy buildings*, in “Applied Energy”, volume 212, 15 Febbraio 2018, pagg 577-591

<sup>9</sup> Paula van den Brom, Arjen Meijer and Henk Visscher, *Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics*, in “Building Research & Information”, Volume 46, 2018, pagg 54-70

di tale *gap*, si è notato come le abitazioni ad alta efficienza energetica inducano gli occupanti a mantenere un livello di comfort più alto rispetto a quelli di case inefficienti energeticamente. Un maggiore livello di comfort implica un maggiore dispendio energetico non preventivato nella fase di calcolo. Sono fattori di influenza sui consumi energetici effettivi:

- la temperatura interna settata;
- la frequenza di utilizzo degli apparecchi elettrici e il periodo temporale di accensione;
- la frequenza di utilizzo dell'acqua calda sanitaria;
- la frequenza di ventilazione;

L'interessante studio di Van den Brom, Meijer, Visscher evidenzia come le caratteristiche degli occupanti (in particolare età e risorse economiche) abbiano un'influenza statistica sull'entità del *gap*. Benché tale studio sia indirizzato agli edifici residenziali, esso presenta materia di riflessione essenziale anche nell'ambito commerciale e di servizi. Anche nel caso dello studio di un vetro dinamico attivo, che ha la possibilità di essere controllato dagli occupanti, il fattore umano riveste un ruolo fondamentale sull'efficacia di tale componente nel bilancio complessivo.

### Utilizzo di energia rinnovabile

Per quanto riguarda la produzione di energia mediante fonti energetiche rinnovabili le tecnologie di più larga applicazione sono quella solare, quella eolica, e da biomassa. Tuttavia spesso per ottimizzare i costi e l'efficienza di tali impianti è necessario creare un sistema su larga scala. Per questo si tende a connettere gli edifici NZEB a una rete infrastrutturale energetica.<sup>10</sup>

La tecnologia maggiormente utilizzata è quella dell'impianto fotovoltaico, la cui efficacia risulta meno dipendente dalla scala dell'impianto rispetto alle altre tecnologie. Tuttavia essa presenta alti costi di realizzazione e un lungo *payback period*; infine lo smaltimento dei moduli dismessi non è un problema di facile soluzione data la complessità del manufatto.

### 1.4 INCIDENZA DELL'ENERGIA UTILIZZATA DALL'EDIFICIO SUL CONSUMO DI ENERGIA GLOBALE

Recenti studi portati avanti dalla EIA (*Energy Information Administration*), organismo che raccoglie e pubblica le statistiche energetiche ufficiali del governo USA, identificano lo stato attuale della ripartizione di consumo energetico tra i diversi settori energivori.<sup>11</sup>

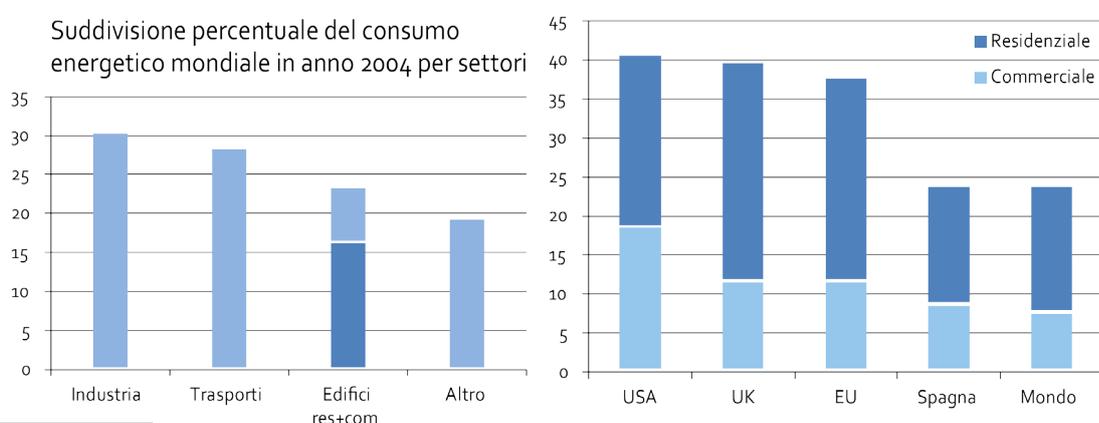


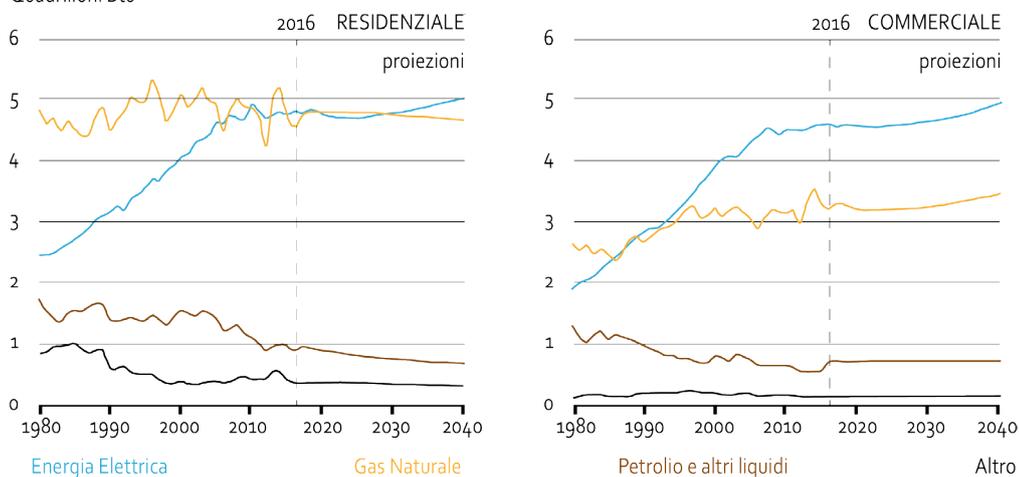
Fig. 1

<sup>10</sup> Ilgor Sartori, Assunta Napolitano, Karsten Voss, *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*, in "Energy and Buildings", Volume 48, Maggio 2012, pagg 220-232

<sup>11</sup> Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2006*, U.S. Department of Energy, Giugno 2006, consultato su <https://www.eia.gov/> [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf)

Come sottolineato da Pérez-Lombard, Ortiz e Pout<sup>12</sup> il contributo al consumo energetico totale mondiale dato dagli edifici residenziali e commerciali varia tra il 20% e il 40%, con significative differenze a seconda del paese considerato. In Spagna il consumo dovuto agli edifici si aggira intorno al 23% del totale; in Inghilterra esso cresce sino al 39%. La media Europea, poco inferiore a quella inglese, sta sul 37%, e quella mondiale intorno al 24%. Tale percentuale risulta frutto di una rapida crescita degli ultimi anni e pare essere destinata ad aumentare ulteriormente per due ragioni principali: la crescita dei paesi ancora in via di sviluppo, l'aumento di popolazione e l'aumento della richiesta di dispositivi energivori (quali condizionatori, personal computer, nuovi strumenti tecnologici) per soddisfare le nuove soglie di comfort affermate nei paesi sviluppati. Il consumo dovuto agli edifici in Europa ha ormai superato quello dovuto ai settori del trasporto e dell'industria. Risulta dunque essenziale agire in questo campo per ridurre il consumo mondiale di energia, che tra il 1984 e il 2004 è cresciuto del 49% considerando l'energia primaria, mentre le emissioni di CO2 sono cresciute del 43% (crescita annuale rispettiva del 2% e 1,8%).

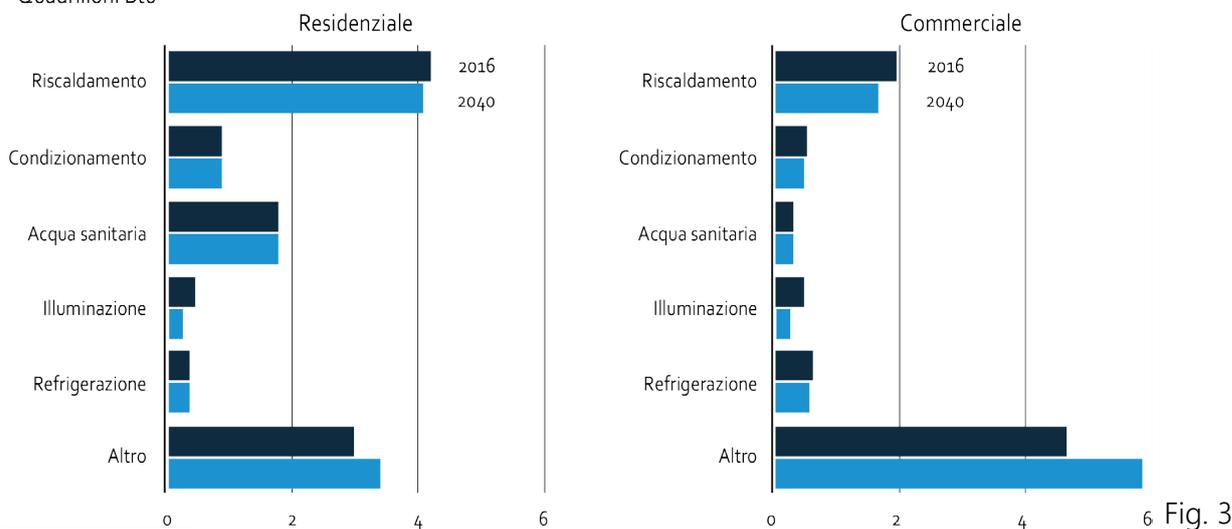
Consumo di energia dovuto ai combustibili nei settori residenziale e commerciale  
Quadrilioni Btu



Altro Fig. 2

Una nota positiva è che secondo gli studi della EIA i consumi energetici negli ultimi anni si sono all'incirca stabilizzati, e le proiezioni future mantengono stabili tali livelli [Fig. 2], a condizione che non si fermi l'impegno nel miglioramento dell'efficienza energetica dei dispositivi.

Consumo energetico dei settori residenziale e commerciale  
Quadrilioni Btu



6 Fig. 3

<sup>12</sup> Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout, A review on buildings energy consumption information, in "Energy and Buildings", Volume 40, Issue 3, 2008, Pagg 394-398

Le proiezioni includono la riduzione dell'energia spesa per l'illuminazione grazie all'introduzione di lampadine a maggiore efficienza energetica, ma l'aumento nella categoria *other*, dovuto a piccoli dispositivi elettronici, cellulari e l'uso dei network<sup>13</sup> [Fig.3]. Tuttavia i consumi sono molto alti rispetto al livello di riferimento fissato al 1980 e risulta dunque prioritario intervenire con delle strategie di risparmio ed efficienza energetica.

## 1.5 RIPARTIZIONE DELL'ENERGIA UTILIZZATA DALL'EDIFICIO NEI DIVERSI USI

Innanzitutto occorre operare una distinzione tra gli edifici domestici e gli edifici non domestici (commerciali e servizi). In entrambi i casi la maggiore quota di energia consumata dall'edificio è dovuta al riscaldamento, al raffrescamento e alla ventilazione ("*HVAC*": *heating, ventilation, air-conditioning*): infatti tali esigenze sono responsabili del consumo di più del 40% del totale dell'energia.

Nel caso degli edifici domestici la restante parte è suddivisa tra energia consumata per il riscaldamento dell'acqua sanitaria ("*DHW*": *domestic hot water*), in media attorno al 18%, ma con consistenti variazioni in base al luogo considerato, per l'illuminazione, per la preparazione del cibo e l'utilizzo di dispositivi elettronici, quota che sta diventando sempre più gravosa sul risultato finale [Fig. 4].

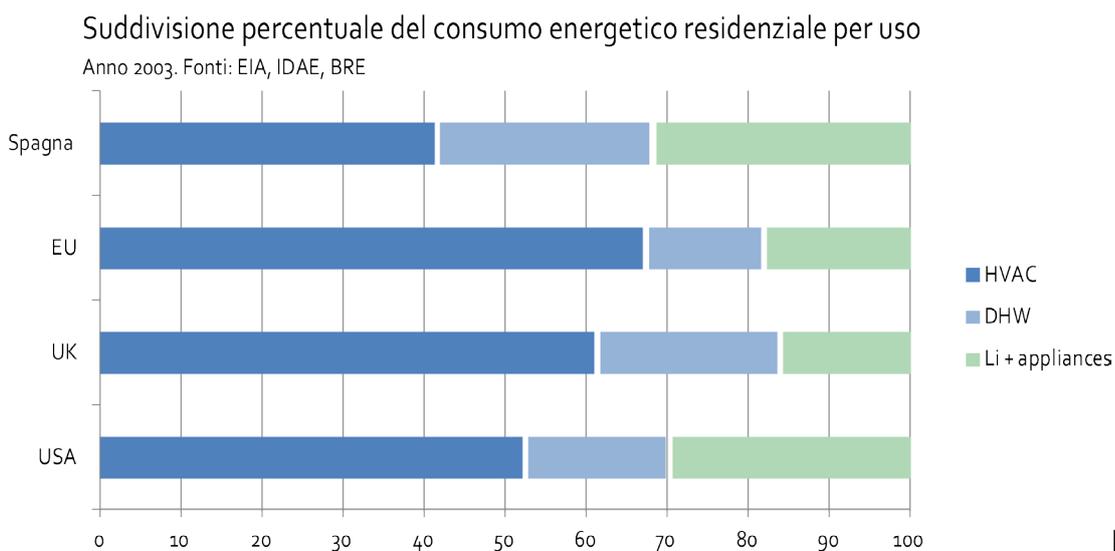


Fig 4

Nel caso degli edifici non domestici i restanti consumi si suddividono tra illuminazione (15%), dispositivi (10%) e altro.<sup>14</sup>

Risulta evidente in entrambi i casi la necessità ridurre i consumi dovuti a *HVAC*. Per comprendere dove occorre agire per raggiungere tale risultato è necessario identificare i fattori che contribuiscono a creare o ridurre il carico di riscaldamento, di raffrescamento e di ventilazione di un edificio.

<sup>13</sup> Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050, Residential energy consumption survey (RECS), consultato su [www.eia.gov/aeo](http://www.eia.gov/aeo)

<sup>14</sup> Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050, Residential energy consumption survey (RECS), consultato su [www.eia.gov/aeo](http://www.eia.gov/aeo)

## 1.6 FABBISOGNO ENERGETICO DI UN EDIFICIO

Consideriamo un qualsiasi edificio come un sistema termodinamico aperto inserito in un ambiente. Esso scambia massa ed energia con l'ambiente in cui è inserito, ricevendo o cedendo a seconda delle condizioni interne ed esterne. In particolare possiamo identificare i seguenti apporti energetici e le seguenti dispersioni:

**Apporti interni sensibili:** la presenza di persone all'interno dell'edificio porta un carico energetico al sistema, poiché ogni essere umano produce, a seconda del tipo di lavoro che conduce, un'emissione termica che va da 115 a 440 W. Inoltre la presenza di dispositivi elettrici in funzione provoca un dissipamento di energia sotto forma di calore che accresce il carico termico interno.

**Apporti solari:** Il passaggio della radiazione solare attraverso gli elementi trasparenti porta all'interno dell'edificio un carico di energia dipendente dalle caratteristiche dell'elemento trasparente (vedere paragrafo 1.8). Tale energia passa principalmente sotto forma di luce e di radiazione infrarossa a lunghezza d'onda appena seguente a quella visibile (*"NIR": near infrared region*).

**Dispersioni attraverso superfici di confine:** gli elementi opachi e trasparenti che compongono l'edificio permettono il passaggio di quantità più o meno elevate di energia termica per conduzione e irraggiamento, sia dall'interno che dall'esterno dell'edificio. Ogni qualvolta si verifichi una differenza di temperatura tra gli ambiente interno ed esterno a contatto con l'involucro edilizio avviene un passaggio di calore per conduzione. Inoltre la superficie esterna si riscalda per irraggiamento se sottoposta alla radiazione solare. Quando la radiazione solare incontra una superficie opaca essa verrà in parte riflessa, a seconda del colore, della struttura e della composizione della stessa, e in parte assorbita. La quota assorbita viene in parte re-irradiata esternamente e internamente e in parte trasmessa per conduzione attraverso la parete in quantità dipendente dalla conducibilità termica del materiale di cui essa è costituita. L'energia trasmessa attraverso un componente non omogeneo nell'unità di tempo per unità di superficie e differenza di temperatura viene espressa dal parametro detto trasmittanza (U). Poiché il calore si trasmette sempre dalle zone più calde alle più fredde, a seconda di quale confine sia a contatto con la temperatura maggiore, le dispersioni termiche causano il passaggio di calore verso l'interno o al contrario verso l'esterno.

**Dispersioni per ventilazione:** definiamo la ventilazione come «Immissione e/o estrazione progettata di aria in e/o da uno spazio chiuso allo scopo di mantenervi condizioni di salubrità<sup>15</sup>». È necessario mantenere una regolare sostituzione dell'aria interna a un edificio per garantirne la vivibilità. Com'è noto il movimento d'aria contribuisce allo spostamento di ragguardevoli flussi di calore per convezione; inoltre porta all'interno dell'edificio portate d'aria con condizioni termogrometriche differenti da quelle già presenti nel sistema, a volte favorevoli al comfort interno (ventilazione estiva), altre sfavorevoli. La ventilazione può essere naturale, meccanico o ibrida.

---

<sup>15</sup> Norma UNI/TS 11300-1, Ottobre 2014, p. 7

Possiamo definire il fabbisogno di energia termica di un edificio come la «quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo<sup>16</sup>». Esso varia a seconda della stagione considerata, poiché variano le condizioni dell'ambiente esterno. Per convenzione si considerano positivi i carichi termici in ingresso o interni all'edificio, e negativi i carichi termici in uscita.

### Fabbisogno energetico invernale

Nel caso invernale gli apporti interni sensibili e gli apporti solari aumentano l'energia e il calore dell'ambiente interno. Occorre sfruttare il più possibile tali apporti, e in particolare permettere il passaggio della radiazione solare attraverso gli elementi trasparenti. Al contrario la più alta temperatura interna causa la dispersione di calore per conduzione attraverso le superfici di confine opache e trasparenti e attraverso i ponti termici, nonché la dispersione di calore per ventilazione. Il fabbisogno energetico sarà dunque:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - h_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - h_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol,w})^{17}$$

Dove

$Q_{H,ht}$  = scambio di energia termica totale nel caso di riscaldamento, espresso in MJ;

$h_{H,gn}$  = fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica;

$Q_{gn}$  = apporti totali di energia termica, espressi in MJ;

$Q_{H,tr}$  = scambio di energia termica per trasmissione nel caso di riscaldamento, [MJ];

$Q_{H,ve}$  = scambio di energia termica per ventilazione nel caso di riscaldamento [MJ];

$Q_{int}$  = apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne, [MJ];

$Q_{sol,w}$  = apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati, [MJ];

$h_{H,gn}$  : si introduce nel bilancio un fattore, compreso tra 0 e 1, che tiene conto del fatto che non tutti gli apporti saranno utilizzati.

### Fabbisogno energetico estivo

Nel caso estivo gli apporti interni sensibili e gli apporti solari aumentano l'energia e perciò il carico di raffrescamento: sono dunque da considerare negativi e occorre limitarne l'effetto. La ventilazione può portare un contributo positivo o negativo a seconda delle condizioni dell'aria esterna. Infatti grandi apporti solari tendono a innalzare la temperatura interna al sistema a valori più alti di quelli dell'aria esterna. In questo caso la ventilazione immette all'interno dell'edificio aria alle condizioni termo-igrometriche esterne e dunque contribuisce a riportare alla condizione desiderata le condizioni interne. Se al contrario la temperatura esterna è molto maggiore di quella interna la ventilazione accresce il carico termico interno all'edificio. Il fabbisogno energetico estivo di un edificio è calcolabile con la seguente equazione:

<sup>16</sup> Norma UNI/TS 11300-1, Ottobre 2014, p. 6

<sup>17</sup> Norma UNI/TS 11300-1, Ottobre 2014, p. 10

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - h_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol,w}) - h_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})^{18}$$

Dove

$Q_{gn}$  = apporti totali di energia termica, espressi in MJ

$h_{C,ls}$  = fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica;

$Q_{C,ht}$  = scambio di energia termica totale nel caso di raffrescamento, [MJ];

$Q_{int}$  = apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne, [MJ];

$Q_{sol,w}$  = apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti

$Q_{H,tr}$  = scambio di energia termica per trasmissione nel caso di riscaldamento, [MJ];

$Q_{H,ve}$  = scambio di energia termica per ventilazione nel caso di riscaldamento, [MJ];

I tradizionali accorgimenti per la progettazione energeticamente efficiente mirano ad abbattere il fabbisogno termico di riscaldamento attraverso l'aumento del potere isolante dell'involucro, in modo da contenere le dispersioni attraverso le superfici di confine. Inoltre mantenendo un'ampia superficie trasparente è possibile massimizzare gli apporti energetici solari. Tali elementi di progettazione, ottimi nel periodo invernale, risultano tuttavia svantaggiosi nel periodo estivo: un involucro molto isolato non permette la dispersione del calore accumulata durante il giorno nel periodo notturno e un'ampia superficie vetrata, se non adeguatamente schermata, aumenta in modo considerevole il fabbisogno energetico di raffrescamento. Al fine di limitare gli effetti negativi sopra citati occorre progettare un adeguato sistema di schermi, quali tende e superfici ombreggianti orizzontali e verticali. Tuttavia tali elementi di schermatura spesso compromettono le qualità ottico-visive delle superfici trasparenti e pur risultando efficaci dal punto di vista termico pregiudicano un adeguato livello di comfort visivo. Inoltre la staticità dei componenti considerati può risultare svantaggiosa perché non facilmente adattabile alle variazioni climatiche esterne. Per questo motivo uno dei filoni di ricerca ultimamente approfonditi riguarda la possibilità di utilizzare dei componenti dinamici, che si adattino alle condizioni esterne.

### Fabbisogni di energia per l'illuminazione

In tutti i casi occorre considerare sia il dispendio energetico dovuto all'impianto di illuminazione che ha il compito di mantenere un certo livello di illuminamento sul piano orizzontale per permettere il corretto svolgimento dei compiti visivi, sia gli apporti termici dovuti al suo funzionamento e strettamente dipendenti dal tipo di tecnologia utilizzata. Il fabbisogno di energia per illuminazione di un edificio è calcolabile con la seguente equazione:

$$E_L = E_{L,int} + E_{L,est}$$

Dove

$E_{L,int}$  = fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione interna dell'edificio [kWh];

$E_{L,est}$  = fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione esterna dell'edificio [kWh];

<sup>18</sup> Norma UNI/TS 11300-1, Ottobre 2014, p. 10

## 1.7 POTENZIALITÀ DI UN EDIFICIO DINAMICO

Come precedentemente accennato l'obiettivo di minimizzare il consumo energetico dell'edificio può essere perseguito in due modi. Come Favoino, Overend e Jin illustrano in «The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies<sup>19</sup>» si può seguire una strategia di progetto esclusiva e una strategia selettiva:

«L'approccio esclusivo considera l'edificio come un sistema chiuso e una barriera statica che esclude l'ambiente esterno dall'interno grazie un involucro edilizio ben isolato e a tenuta d'aria. C'è comunque un limite ai risparmi energetici raggiungibili dall'approccio esclusivo [quali i limiti delle stesse prestazioni, per esempio la già citata alta trasmittanza termica dei componenti finestrati]. La seconda strategia progetta l'edificio come filtro tra l'ambiente interno ed esterno. Un involucro selettivo di un edificio modula il flusso di calore e massa facendo uso di elementi di edificio e sistemi adattivi o reattivi che passivamente o attivamente modificano le loro proprietà termo-ottiche o operazioni in modo reversibile così da adattarsi alle dinamiche condizioni ambientali esterne o interne (radiazione solare, temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento, apporti interni, ecc) con differenti scale temporali»<sup>20</sup>

La strategia selettiva dunque prevede l'utilizzo di sistemi dinamici per la regolazione del flusso energetico e di calore entrante all'interno dell'edificio. Tali sistemi, in confronto a quelli tradizionali statici, permettono di ottenere più alti livelli di comfort senza accrescere in modo significativo il consumo di energia<sup>21</sup>. Poiché, come abbiamo visto in precedenza<sup>22</sup>, l'*energy performance gap* può essere dovuto anche all'innalzamento dei livelli di comfort e all'azione dell'uomo non preventivata sui componenti e sugli impianti volta a questo obiettivo, la progettazione di sistemi che non siano esageratamente sensibili alla variabilità di tali soglie permette di diminuire il rischio di un aumento di consumi imprevisto.

I sistemi dinamici operano la selezione dell'energia entrante grazie alla modificazione delle loro proprietà termo-ottiche, principalmente di trasmittanza, trasmissione solare e visibile.

Gli autori identificano i sistemi e componenti adattivi di facciata più promettenti per la riduzione del consumo energetico:

- vetri cromogenici

---

<sup>19</sup> Fabio Favoino, Mauro Overend, Qian Jin, *The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies*, in "Applied Energy", Volume 156, 5 Ottobre 2015, Pages 1-2

<sup>20</sup> Fabio Favoino, Mauro Overend, Qian Jin, *supra*, nota 19, Pages 1-2

«The "exclusive" approach considers the building envelope as a "static" barrier that excludes the outdoor environment from the indoor environment by means of a very well-insulated and air tight building envelope. There is, however, a limit to the energy savings achievable by the "exclusive" approach. Larger energy savings may be achieved by designing the building and its envelope as a "selective" filter between the outdoor and the indoor environment. "Selective" building envelopes modulate the heat and mass flow by making use of adaptive or Responsive Building Elements and systems, which passively or actively adjust their thermo-optical properties or operation in a reversible way in order to adapt to changing outdoor/indoor environmental conditions (i.e. solar radiation, air temperature, wind speed and direction, internal loads, etc.), with different time scales of the adaptive mechanisms»

<sup>21</sup> E. Taveres-Cachat, S. Grynning, O. Almas, F. Goia, *Advanced transparent facades- market available products and associated challenges in building performance simulation*, in "Energy Procedia", Volume 132, 2017, Pages 496-501

<sup>22</sup> vedere paragrafo 1.2

- sistemi mobili di schermatura solare mobili
- muratura con materiali a cambiamento di fase integrati
- isolamento con resistenza variabile
- facciate multifunzionali.<sup>23</sup>

Tali sistemi dinamici opachi e trasparenti possono modificare la propria forma o le proprie proprietà in modo passivo, ovvero come reazione alle condizioni ambientali e senza il bisogno dell'azione umana, o attivo, ovvero controllato da un'azione esterna, che sia umana in modo diretto, o grazie a degli input programmati. Tali accorgimenti risultano particolarmente incidenti nella progettazione dell'involucro trasparente dell'edificio, il più sensibile al passaggio attraverso l'edificio di grandi quantità di energia.

## 1.8 INCIDENZA DELL'ENERGIA DISPERSA ATTRAVERSO I VARI COMPONENTI DELL'EDIFICIO

La casistica è molto varia e non permette di generalizzare, ma è sufficiente esaminare i parametri limite fissati da legislazione per le prestazioni degli involucri per comprendere i diversi pesi dei componenti in gioco e l'importanza della parte trasparente.

zona climatica	U <sub>limite</sub> 2015				U sistemi vetrati	
	Op <sub>vert</sub>	Op <sub>or_cop</sub>	Op <sub>or_pav</sub>	Tr <sub>fin+serr</sub>		
A e B	0,45	0,34	0,48	3,20	vetro singolo	5,0 < U > 6,0
C	0,40	0,34	0,42	2,40	doppio vetro aria	1,4 < U > 3,3
D	0,36	0,28	0,36	2,10	doppio vetro argon	1,3 < U > 3,0
E	0,30	0,26	0,31	1,90	triplo vetro aria	1,0 < U > 2,3
F	0,28	0,24	0,30	1,70	triplo vetro argon	0,8 < U > 2,1

Come emerge dalla tabella non solo i valori limite degli elementi trasparenti sono da 6 a 10 volte maggiori rispetto ai corrispettivi opachi da normativa, ma i vetri che normalmente ancora oggi sono utilizzati per le nuove costruzioni e ristrutturazioni (vetri doppi) presentano valori tra le 3 e le 10 volte maggiori dei limiti di trasmittanza dei componenti opachi. In letteratura è confermato che in un edificio standard le dispersioni attraverso gli elementi trasparenti possono essere fino a centinaia di volte maggiori delle corrispettive opache<sup>24</sup>. Infatti mentre è possibile accrescere l'isolamento della parte opaca con relativa facilità e costi decisamente contenuti aumentando lo spessore dell'isolamento, non è altrettanto semplice diminuire la trasmittanza della parte trasparente. Non solo il valore più basso raggiunto da un sistema vetrato doppio è di poco inferiore a 0,9 W/m<sup>2</sup>K (doppio vetro con vuoto), ma il costo associato al raggiungimento di tali prestazioni sale esponenzialmente. Le prestazioni dei sistemi vetrati con doppia camera e triplo vetro sono maggiormente performanti, e il valore minore (dati di ricerca) raggiunge addirittura 0,26 W/m<sup>2</sup>K

<sup>23</sup> Fabio Favoino, Mauro Overend, Qian Jin, *supra* nota 19, Pag 2

<sup>24</sup> Karam M. Al-Obaidi, Mazran Ismail & Abdul Malek Abdul Rahman, *A Review of Skylight Glazing Materials in Architectural Designs for a Better Indoor Environment*, in "Modern Applied Science", Volume 8, Issue 1, 2014, Pagg 68-82

nel caso in cui nelle due camere sia creato il vuoto<sup>25</sup>. Tuttavia tale risultato a scapito del peso del componente finestrato e soprattutto del costo, senza considerare la difficoltà tecnica di realizzazione del manufatto. Risulta dunque molto difficile trovare in commercio tali esempi di sistemi vetrati.

Tipo di finestra	Cavità	U [W/m <sup>2</sup> K]
Vetro singolo		5,79 - 6,3
Vetro doppio	aria	2,78 - 3,24
	argon	2,61 - 2,95
	argon+low-e	1,5 - 1,99
	vuoto	0,86
	aerogel monolitico	0,63
	aerogel granulare	1,69
	vuoto+elettrocromico	< 1,00
	Vetro triplo	con vuoto

### 1.9 PRESTAZIONI E INNOVAZIONI SETTORE VETRO

I componenti trasparenti rivestono un ruolo di importanza fondamentale nel funzionamento dell'edificio: garantiscono l'ingresso della luce naturale all'interno dell'ambiente permettendo il contenimento dei consumi energetici per illuminazione artificiale e allo stesso tempo consentendo la visione dell'ambiente esterno, fattore fondamentale per il benessere umano. Inoltre permettono un ricambio d'aria controllato dalla persona presente in ambiente. Infine, come già è stato sottolineato, anche a livello energetico sono un elemento fondamentale per gli apporti di calore dovuti alla radiazione solare trasmessa, anche se i bassi livelli di isolamento li rendono elementi problematici per le dispersioni termiche invernali. Il parziale passaggio della radiazione solare, e dunque non solo il passaggio di luce, ma anche di energia si rivela essere un arma a doppio taglio: tale elemento risulta positivo quando l'edificio necessita di energia e calore per mantenere i livelli di comfort interni, dunque nella condizione di «Heating», nel periodo di riscaldamento. Tuttavia la situazione si inverte nel periodo di «Cooling», di raffrescamento, ovvero quando l'edificio spende energia per refrigerare gli ambienti interni. Tutti gli apporti energetici che contribuiscono ad aumentare il calore interno all'ambiente, siano essi dovuti alla presenza di persone, apparecchi domestici e tecnologici o alla radiazione solare accrescono il carico che l'impianto di raffrescamento dovrà abbattere.

Esaminiamo ora le caratteristiche della luce ed energia solare e il suo comportamento nel passaggio attraverso il componente.

Lo spettro solare copre un intervallo molto vasto di lunghezza d'onda, dall'ultravioletto alle onde radio (radio wave). Tuttavia la terra è raggiunta da una componente parziale di queste onde; in particolare la radiazione che raggiunge la superficie terrestre ha lunghezza d'onda compresa tra 0.25 – 2.5 mm, di cui la luce visibile, compresa tra gli 0,48 e 0,78  $\mu\text{m}$ , porta il 42.8% dell'energia solare. La restante percentuale è dovuto quasi interamente alla componente infrarossa tra gli 0.7

<sup>25</sup> Snehashis Ghoshal, Subhasis Neogi, *Advance Glazing System – Energy Efficiency Approach for Buildings a Review*, in "Energy Procedia", Volume 54, 2014, Pagg 352-358

e 2.5 mm (NIR), mentre il contributo della componente ultravioletta (UV) è quasi ininfluenza<sup>26</sup>.

Il vetro a sua volta non permette il totale passaggio della radiazione solare, ma suddivide la radiazione incidente in tre componenti: componente assorbita, riflessa e trasmessa. A seconda delle caratteristiche del vetro tali percentuali possono subire una variazione molto ampia.

L'energia solare trasmessa in ambiente nel colpire le superfici le riscalda per irraggiamento. In condizione estiva dunque è necessario respingere il più possibile l'energia entrante in modo da ridurre il carico di raffrescamento. Tale obiettivo è tradizionalmente perseguito grazie all'utilizzo di schermature esterne, che bloccano la radiazione solare prima del suo passaggio all'interno dell'ambiente trasformandola da alta lunghezza d'onda in radiazione a bassa lunghezza d'onda - infrarossa. La struttura chimica del vetro permette il passaggio della radiazione ad alta lunghezza d'onda, ma ferma la radiazione infrarossa, dunque tutta la parte di radiazione incidente sulla schermatura non può passare all'interno dell'ambiente. La presenza di una tenda interna invece permette l'ingresso dell'energia solare e dunque di calore all'interno dell'ambiente, poiché la radiazione ad alta lunghezza d'onda passa attraverso il vetro, viene assorbita dal materiale della tenda e viene trasformata in radiazione infrarossa, e rimane a questo punto intrappolata all'interno dell'ambiente. Soprattutto nell'ambito non residenziale, è frequentemente necessaria la presenza di schermatura esterne o interne per evitare problemi di comfort visivo (abbagliamento) e termico (surriscaldamento).

Per procedere con l'analisi delle prestazioni dell'elemento vetro occorre caratterizzarlo attraverso lo studio dei parametri principali che ne descrivono il comportamento.

**U** : trasmittanza termica, definita come il grado di calore che fluisce tra un ambiente interno ed esterno in presenza di una differenza di temperatura<sup>27</sup>. Risultato dei fenomeni di conduzione viene misurata in  $W/m^2K$ .

**T<sub>sol</sub>** : Trasmissione solare, essa è il rapporto tra la quantità di radiazione diretta e diffusa trasmessa dal componente vetrato e la totale radiazione incidente su tale componente.

**T<sub>vis</sub> (VT)** : Trasmissione solare visibile, ovvero la porzione di luce visibile che passa attraverso il componente vetrato. Essa coinvolge dunque le lunghezze d'onda tra 0,38 e 0,78 mm.

**K<sub>e</sub>** : indice di selettività, è il rapporto tra  $T_{vis}$  e  $T_{sol}$ . Indica qual è la componente dominante che attraversa il vetro. Tale parametro varia generalmente tra 0,10 e 2,41.

**SC** : *shading coefficient*, è il rapporto tra la radiazione solare che passa attraverso il vetro esaminato e quella che passa attraverso un vetro chiaro laminato di 3 mm di spessore.

**g** o **SHGC** : *solar heat gain coefficient* o fattore solare, è la misura dell'energia termica solare trasmessa direttamente o indirettamente (attraverso assorbimento o trasmissione) attraverso il componente finestrato considerando l'irradianza diretta e diffusa<sup>28</sup>. Varia tra 0 e 1.

**a** : fattore di assorbimento,  $I_a/I_i$  indica la percentuale di radiazione che viene assorbita dal componente rispetto alla totale incidente

<sup>26</sup> <http://tredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>.

<sup>27</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment*, in "Solar Energy Materials and Solar Cells" Volume 159, 1 Gennaio 2017, p 27

<sup>28</sup> Jan Wienold, *Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis*, in Conference of the International-Building-Performance-Simulation-Association 10, 2007, Beijing

**r**: fattore di riflessione,  $I_r/I_i$  indica la percentuale di radiazione che viene riflessa dal componente rispetto alla totale incidente

**t**: fattore di trasmissione,  $I_t/I_i$  indica la percentuale di radiazione che viene trasmessa dal componente rispetto alla totale incidente

**e**: emissività, è il rapporto tra l'energia irradiata da un materiale e quella irradiata da un corpo nero alla stessa temperatura. Riveste un valore che sta tra 0 e 1.

## VETRO CHIARO

Vetro trasparente senza particolari trattamenti, è caratterizzato da un alto valore di trasmittanza termica (di norma tra 5,6 e 6,4 W/m<sup>2</sup>K) e di trasmissione solare visibile e NIR (infrarossa), mentre presenta valori molto bassi di trasmissione per le ampie lunghezze d'onda. La superficie è caratterizzata da un alto valore di emissività. Esso trasmette una grande quantità di energia solare, elemento negativo in condizioni climatiche dove è necessario il raffrescamento estivo<sup>29</sup>.

## VETRO COLORATO

Esistono due tipi di vetro colorato<sup>30</sup>: la colorazione del vetro può essere dovuta alla presenza di pigmenti nella matrice vetrosa. Tali tipi di lastre riducono il passaggio dell'energia solare, ma anche di quella visibile. Altri tipi di vetri presentano invece un rivestimento interno in ossidi metallici che riflette il calore all'interno o all'esterno dell'edificio. Esso riesce a mantenere un alto valore di trasmissione visibile pur riducendo il passaggio di calore.

Di norma i colori disponibili variano tra il Bronzo, Blu, Verde e Grigio. Ultimamente sono stati prodotti dei tipi di vetro colorato come Azurlite o Evergreen che risultano spettralmente selettivi e permettono un alto passaggio di luce visibile con un efficace controllo della parte termica. I colori blu e verde sono i più validi in questo campo poiché permettono il passaggio della luce tra lo 0.38 e 0.78 mm ma sono caratterizzati da bassissima trasmissione nella parte ultravioletta.

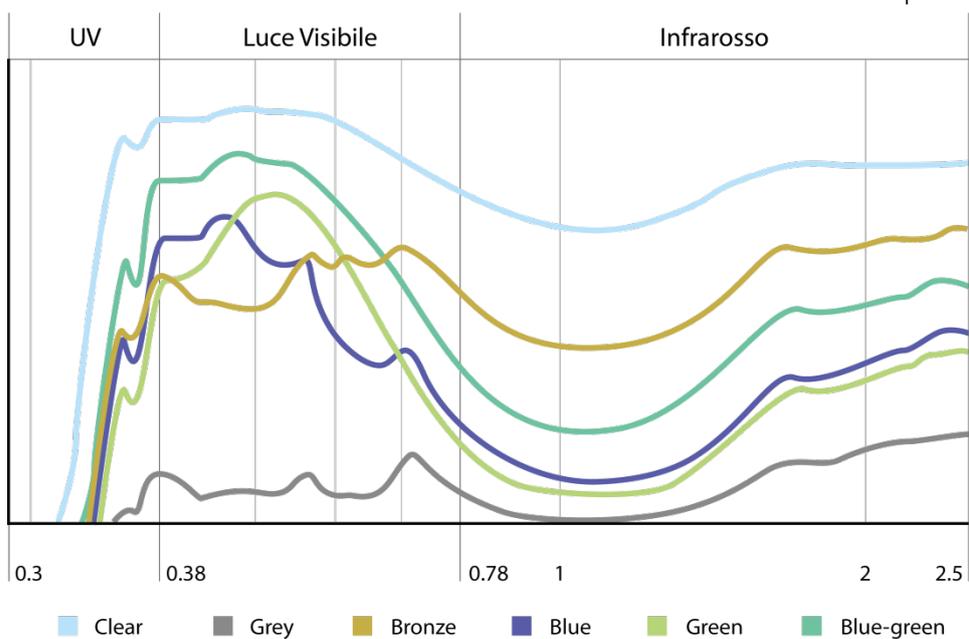


Fig 5

<sup>29</sup> H.Pfaender, *Schott Guide to Glass*, Springer, Netherlands, 1996, pp.51-83, consultato su [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0517-0\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0517-0_4).

<sup>30</sup> Karam M. Al-Obaidi, Mazran Ismail & Abdul Malek Abdul Rahman, *A Review of Skylight Glazing Materials in Architectural Designs for a Better Indoor Environment*, in "Modern Applied Science", Vol. 8, Novembre 2014 p. 74

Più specificatamente si tratta di un vetro chiaro a cui sono aggiunti dei componenti metallici colorati nel processo di galleggiamento. Tali componenti non incidono sulla trasmittanza termica, ma riducono la trasmissione solare del vetro e la visibilità aumentando la percentuale di radiazione assorbita e re-irradiando il calore assorbito all'interno. L'alta capacità di assorbimento del vetro fa in modo che esso si riscaldi a temperature maggiori di un tradizionale vetro chiaro. La trasmissione solare visibile varia tra gli 0,26 e lo 0,79 a seconda del colore (bronzo, verde, grigio) e dello spessore della lastra (di norma 5 mm)<sup>31</sup>. Per le caratteristiche di bassa trasmissione e alto assorbimento sono chiamati anche vetri assorbenti. Sono utilizzati innanzitutto per ridurre il discomfort dato dall'abbagliamento e dalla trasmissione solare<sup>32</sup>.

### VETRO RIFLETTEnte

Questo tipo di vetro presenta un sottile film di rivestimento in ossidi metallici che riflette la radiazione incidente. A seconda della posizione del film e del suo coefficiente di riflessione varia la trasmissione solare (con riduzioni intorno al 40%) e il fattore solare, mentre il valore di U rimane quasi invariato. Esistono anche film riflettenti plastici, meno durevoli rispetto a quelli metallici. I vetri riflettenti possono assumere diverse colorazioni (bronzea, argentea e aurea) e grazie alla riflessione dell'ambiente esterno possono essere molto interessanti a livello progettuale, tuttavia possono creare disturbo a livello del traffico veicolare e pedonale per abbagliamento<sup>33</sup>.

### VETRO ANTIRIFLESSO

Al contrario del vetro precedente tale tipo di vetro ha come obiettivo l'aumento della trasmissione della luce ed energia solare. Si può aumentare fino a 0,015 la trasmissione di luce visibile di una finestra doppia senza modificare i valori di trasmittanza. Per raggiungere tale scopo si può agire incrementando l'indice di rifrazione del materiale di rivestimento strato dopo strato, oppure utilizzare un rivestimento con una struttura porosa. In questo modo la riflessione del materiale viene ridotta al minimo<sup>34</sup>.

### VETRO AUTOPULENTE

Tale tipo di vetro viene utilizzato per ridurre i costi di manutenzione e mantenere i valori di trasmissione solare evitando il depositarsi di polveri e inquinanti sulla superficie. Possono essere associati alle celle fotovoltaiche per mantenerne costante l'efficienza. La superficie dei vetri autopulenti può essere idrofoba (dove le polveri vengono portate via dallo scorrere delle gocce d'acqua) o idrofila (dove l'acqua forma un velo che fa scivolare via gli inquinanti)<sup>35</sup>.

**VETRO SELETTIVO:** si tratta di un vetro che permette il passaggio di selezionati intervalli di spettro di radiazione solare, riflettendone altri. Tali intervalli variano a seconda del materiale utilizzato. Di tale famiglia fanno parte:

---

<sup>31</sup> G. Leftheriotis, P. Yianoulis, *Comprehensive Renewable Energy*, A. Sayigh (Ed.), Elsevier, Oxford, 2012, pp. 313–355, consultato su <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00310-3>

<sup>32</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *Innovative solar windows for cooling-demand climate*, in "Solar Energy Materials and Solar Cells", Volume 94, Issue 2, Febbraio 2010, pagg 214-215

<sup>33</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 32, pagg 214-215

<sup>34</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p 32

<sup>35</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p 34

## VETRO CON RIVESTIMENTO BASSO EMISSIVO (LOW-E)

Si tratta di un vetro con un rivestimento formato da un sottile film di ossidi metallici posizionato tra due layer dielettrici. In particolare si trovano quattro strati di ossidi metallici: un primo strato di adesione, uno strato di argento, principale responsabile delle caratteristiche di isolamento del film basso-emissivo, uno strato protettivo e uno strato di rivestimento. Il rivestimento basso-emissivo permette di respingere all'interno dell'ambiente l'energia termica con alta lunghezza d'onda in modo da diminuire le dispersioni di calore nel periodo di riscaldamento. Le proprietà ottiche del rivestimento basso emissivo sono concepite in modo da riflettere la radiazione infrarossa mantenendo alta la trasmissione luminosa e permettendo il passaggio della radiazione solare dall'esterno verso l'interno. Tuttavia nel periodo di raffrescamento il vetro può re-irradiare calore all'interno influenzando la temperatura dell'ambiente, dato che può raggiungere temperature intorno ai 40°.

## VETRO CON RIVESTIMENTO A CONTROLLO SOLARE

Anche in questo caso il vetro viene rivestito con un film metallico posizionato tra due strati dielettrici. Lo strato metallico, generalmente Ag, Al, Cu, Au, mantiene un'alta trasmissione sulle lunghezze d'onda nel campo del visibile, aumentando invece la riflessione su radiazioni con lunghezza d'onda maggiore, quale l'infrarosso, che come abbiamo visto è il responsabile di quasi il 50% di energia entrante. Tali tipi di vetro sono dunque utilizzati per controllare e ridurre gli apporti solari senza compromettere la trasmissione luminosa, e sono utilizzati in luoghi dove è preponderante la necessità di raffrescamento. Essi riflettono la radiazione NIR con lunghezza d'onda compresa tra lo 0,78 e 2,5  $\mu\text{m}$ <sup>36</sup>.

## VETRO FOTOVOLTAICO

In inglese "*PV glazing*", tale tipo di tecnologia permette di ridurre la trasmissione solare grazie all'ombreggiamento generando al contempo elettricità grazie alle celle fotovoltaiche accoppiate al vetro. Di norma viene accostata a una lastra di vetro chiaro un layer di celle solari con silicio monocristallino traforate. Questo permette un uniforme passaggio di luce, caratteristica auspicabile per gli ambienti di lavoro, riducendo di percentuali anche alte il calore in entrata e generando energia elettrica. L'area delle celle solari è direttamente proporzionale all'elettricità generata e inversamente proporzionale alla trasmissione luminosa e al guadagno solare permesso attraverso la vetrata (influenzati dalla dimensione dei fori)<sup>37</sup>.

## AEROGEL (ATFS: Advanced translucent fenestration systems<sup>38</sup>)

Come descritto da Rezaei, Shannigrahi e Ramakrishna<sup>39</sup>, l'aerogel è un materiale molto poroso e leggero (peso specifico: 2 kg/m<sup>3</sup>) composto da silice e aria. Esistono due tipologie di aerogel, entrambe caratterizzate da ottime proprietà isolanti, quali una conduttività termica pari a 0,013 W/m<sup>2</sup>K: l'aerogel di tipo monolitico, che presenta alti valori di trasmissione luminosa, e granulare, dove la trasmissione luminosa è decisamente bassa. Tale materiale può essere utilizzato sia come

<sup>36</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p 29

<sup>37</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 33, p 215

<sup>38</sup> classificazione da 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway

*Advanced transparent facades- market available products and associated challenges in building performance simulation*

<sup>39</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p 32

contenuto della camera isolante tra lastre di vetro, sia come sistema trasparente in sé e come rivestimento. Esso, grazie alle sue proprietà, può agire positivamente nella riduzione dell'abbagliamento e nell'aumento del comfort visivo.

## FINESTRA CON LASTRE MULTIPLE

Come abbiamo visto in precedenza il vetro singolo presenta valori di trasmittanza termica ormai inaccettabili nell'ottica della riduzione dei consumi energetici. Per abbattere tale valore occorre accrescere il numero di lastre della finestra separandole con delle camere la cui dimensione ottimale varia a seconda del contenuto, di norma aria, gas nobili o vuoto. Il cosiddetto vetro-camera è formato da due o più lastre distanziate grazie a un telaio metallico di spessore tra i 6 e i 22 mm<sup>40</sup>. Il telaio viene incollato e pressato alle lastre in modo da garantire la tenuta stagna della camera. La combinazione di lastre con diverse proprietà permette di soddisfare i requisiti desiderati.

### Aria

Aggiungendo una seconda lastra vetrata e riempiendo d'aria la cavità sigillata fra le due è possibile migliorare notevolmente le prestazioni di trasmittanza (abbattimento del 32%) e SHGC (abbattimento del 22%) senza influenzare troppo negativamente la trasmissione luminosa della finestra<sup>41</sup>. La dimensione ottimale di una camera d'aria si aggira intorno ai 12,5-12,7 mm.

### Gas nobili

Il riscaldamento delle lastre di vetro e dell'aria contenuta nell'intercapedine a causa della radiazione termica induce la creazione di moti convettivi all'interno della camera. Poiché l'aria più calda si muove verso la parte superiore della finestra e al suo posto subentra aria più fresca. Il movimento che si crea all'interno della camera è responsabile di un maggiore flusso di calore trasportato per convezione. Dunque per limitare tale fenomeno è possibile inserire nella camera un gas con maggiore inerzia e minore conducibilità: di norma vengono utilizzati gas nobili per le loro caratteristiche di non tossicità e non reattività. I gas più frequentemente utilizzati sono Argon (il più economico), Krypton (con maggiore qualità isolanti, ma più costoso) e lo Xenon (che presenta le migliori prestazioni termiche, ma anche il maggiore costo). Anche in questo caso lo spessore ottimale della camera è all'incirca 12,5 mm<sup>42</sup>. Caratteristica fondamentale dell'efficienza delle finestre con gas in intercapedine è l'efficacia della chiusura della stessa: occorre infatti che la cavità sia perfettamente sigillata perché essa mantenga le sue proprietà termiche. Tale durabilità risulta tuttavia essere un problema non ancora del tutto risolto.

### Vuoto

Lo spazio della camera si riduce a una dimensione ridottissima, di 0,12 mm, e pure raggiunge prestazioni energetiche eccezionali. Infatti una cavità con vuoto di tali dimensioni è in grado di abbattere la trasmittanza termica di una finestra fino a 0,4 W/m<sup>2</sup> nel caso di

<sup>40</sup> Simone Iennarella, *Vetri ad alto isolamento e controllo solare*, in "Responsive transparent building envelopes", p 25

<sup>41</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 33, p 215

<sup>42</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p 32

una finestra di un metro quadro. Tale trasmittanza varia a seconda delle dimensioni della finestra: gli esemplari in commercio sono di solito caratterizzati da una U di 1,5 W/m<sup>2</sup>. Per resistere alla pressione esercitata sulle lastre dalla presenza del vuoto occorre inserire una fitta maglia di mini-pilastri in acciaio inossidabile di 0,32 mm di diametro distribuiti su una griglia spaziale di 25-40 mm<sup>43</sup>. Anche in questo caso l'ermeticità della cavità vuota e la sua durabilità sono essenziali per l'efficacia della finestra, ed elemento tecnico problematico della produzione.

### Flusso d'aria

Ultimamente le ricerche hanno indagato altri tipi di riempimento rispetto ai tradizionali prima presentati. Le finestre con flusso d'aria nella camera, ispirate alle facciate trasparenti ventilate, hanno un comportamento che varia a seconda della stagione considerata: nel periodo di raffrescamento l'aria esausta dell'interno dell'ambiente viene estratta e incanalata nella camera creando un movimento d'aria (naturale o forzato) che permette un parziale raffreddamento per convezione e viene poi diffusa all'esterno. In tal modo la temperatura della superficie interna del vetro di tale sistema risulta decisamente più bassa rispetto a quelli tradizionali, fino a 2,5°C in meno. In alcuni sistemi è possibile anche la rotazione del componente finestra: essa è formata da un pannello in vetro chiaro e uno in vetro assorbente. In estate la finestra presenta esternamente il pannello assorbente, il cui riscaldamento è smorzato dal flusso d'aria in camera. In inverno è possibile ruotare la finestra, che presenterà internamente il pannello assorbente, accorgimento utile al mantenimento del calore interno<sup>44</sup>.

### Flusso d'acqua

Il concetto che è alla base delle finestre con flusso d'aria viene applicato anche con un flusso di acqua. Le finestre con flusso d'acqua in una cavità di circa 10 mm scorre un flusso d'acqua con velocità tra 0,001 e 0,005 m/s. Gli studi riportano che l'utilizzo di tale tecnologia migliora le prestazioni energetiche senza incidere sulla trasmissione visibile del componente finestrato. Limite è la necessità di un impianto apposito per tali tipi di sistemi finestrati<sup>45</sup>.

### Aerogel

Come visto precedentemente<sup>46</sup> la cavità interna alle lastre può essere occupata da uno strato in aerogel monolitico o granulare, materiale con ottime proprietà isolanti e di trasmissione visibile.

## **DOPPIA PELLE VETRATA** (DSF: Double Skin Facades)

Questo sistema vetrato, utilizzato di norma nelle facciate con superficie verticale principalmente trasparente e dunque essenzialmente negli edifici adibiti ad ufficio, consiste in «uno speciale tipo

<sup>43</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 33, p 216

<sup>44</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 33, p 217

<sup>45</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 33, pagg 217-218

<sup>46</sup> vedere pag 24

di involucro dove una seconda “pelle”, di norma vetrata trasparente, viene posta di fronte alla facciata dell’edificio<sup>47</sup>».

Tale ulteriore camera creata esternamente rispetto alla superficie di chiusura verticale può essere chiusa, elemento preferibile nei climi freddi, o aperta in modo da consentire la creazione di moti convettivi al suo interno nei climi caldi. Non è raro che venga associata a un sistema di schermatura e di ventilazione meccanica, che permette il funzionamento ottimale del componente.<sup>48</sup>

Nei climi freddi essa agisce come scambiatore di calore, mantenendo la temperatura dello strato intermedio vicina a quella desiderata nell’ambiente interno<sup>49</sup>. La presenza di un ulteriore strato aumenta inoltre l’isolamento della facciata che, essendo vetrata, presenta valori di trasmittanza termica decisamente più alti rispetto a un edificio prettamente opaco. Nei climi caldi invece la doppia pelle vetrata grazie alla ventilazione interna alla camera permette l’attenuazione del calore trasmesso per convezione all’interno dell’edificio, poiché l’aria calda si muove all’interno dello strato fino a fuoriuscire dalle aperture superiori.

Lo spessore ottimale della cavità d’aria interna varia tra gli 80 e i 100 cm, ma dipende dalla condizione climatica del luogo. Inoltre la cavità d’aria può essere di due tipi: continua sull’altezza o la larghezza dell’edificio, presentando le aperture alla base e alla cima e tutti i livelli connessi, o divisa per livelli.<sup>50</sup>

#### INTEGRAZIONE DI CELLE FOTOVOLTAICHE

In molti casi, non ultimo il grattacielo San Paolo progettato a Torino da Renzo Piano, è stata studiata e attuata la combinazione di doppia pelle vetrata e celle fotovoltaiche. Tale integrazione oltre ad operare gli effetti benefici della doppia pelle, permette di produrre energia termica ed elettrica in situ.

#### FINESTRA IDEALE

Il funzionamento ottimale di una finestra presuppone il variare di alcune sue proprietà a seconda del clima, della posizione e delle condizioni ambientali esterne. La finestra ideale per un clima caldo o per il periodo estivo ha coefficiente di assorbimento pari a 0, riflette totalmente la radiazione infrarossa e ultravioletta (sotto gli 0,4  $\mu\text{m}$  e sopra gli 0,7  $\mu\text{m}$ ) proveniente dall’esterno, mentre risulta totalmente trasparente a quella proveniente dall’interno.

Al contrario per il clima freddo la finestra ideale deve permettere totalmente il passaggio della radiazione infrarossa dall’esterno verso l’interno riflettendo la radiazione infrarossa proveniente dall’interno dell’ambiente.<sup>51</sup>

Il tipo di vetro che si avvicina maggiormente al comportamento ideale invernale è quello di un vetro chiaro con rivestimento basso-emissivo; quello che si avvicina maggiormente al comporta-

<sup>47</sup> N. Safer, M. Woloszyn, J.J. Roux, *Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin façade equipped with a venetian blind*, in “Sol Energy”, volume 79, 2005, p. 193

<sup>48</sup> Ali Ghaffarianhoseini, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Umberto Berardi, John Tookey, Danny Hin Wa Li, Shahab Kariminia, *Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs)*, in “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, Volume 60, Luglio 2016, Pages 1052-1065

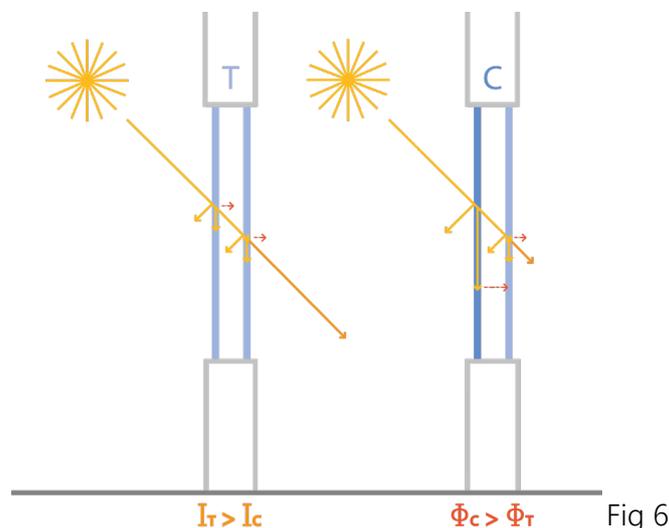
<sup>49</sup> A. Ghaffarianhoseini, A. Ghaffarianhoseini, U. Berardi, J. Tookey, D. Hin Wa Li, S. Kariminia, *supra* nota 48, p. 1058

<sup>50</sup> A. Ghaffarianhoseini, A. Ghaffarianhoseini, U. Berardi, J. Tookey, D. Hin Wa Li, S. Kariminia, *supra* nota 48, p. 1058

<sup>51</sup> Hong Ye, Xianchun Meng, Linshuang Long, Bin Xu, *The route to a perfect window*, in “Renewable Energy”, Volume 55, Luglio 2013, pagg 448-449

mento ideale estivo è un vetro riflettente colorato.

In una vetrata trasparente l'energia viene per la maggior parte trasmessa sotto forma di radiazione diretta all'interno dell'ambiente e scalda l'ambiente stesso dall'interno. Nel caso di un sistema vetrato con lastra esterna colorata la quantità di energia riflessa e assorbita aumenta notevolmente, mentre si riduce quella trasmessa. Dunque la lastra esterna trasferirà più calore per conduzione, convezione e irraggiamento, ma ridurrà l'arrivo della radiazione diretta all'interno dell'ambiente.



Nel bilancio complessivo si sperimenta che la riduzione della radiazione diretta entrante è più incidente dell'aumento del flusso di calore entrante per la riduzione del fabbisogno energetico.

Ovviamente le finestre reali non raggiungono in nessun caso i valori ideali dei parametri sopra presentati, ma a seconda del trattamento o del rivestimento applicato si possono avvicinare più o meno fortemente ad essi. Tuttavia le finestre tradizionali statiche possono agire solo in una delle due direzioni, peggiorando le prestazioni del caso climatico inverso. Per raggiungere le prestazioni ideali sia in periodo invernale che estivo occorrerebbe avere la possibilità di modificare le proprietà della finestra a seconda della condizione climatica ambientale esterna. Dalla volontà di raggiungere tale obiettivo si sviluppano gli studi, che negli anni sono stati sempre più approfonditi, sulle cosiddette *Smart Windows*, "finestre intelligenti", che modificano le proprie caratteristiche a seconda degli stimoli esterni.

## 1.10 SMART WINDOWS

Le "finestre intelligenti" sono finestre le cui proprietà termo-ottiche sono alterate da uno stimolo esterno quale corrente elettrica, voltaggio, o una variazione climatica legata alla temperatura o alla quantità di radiazione incidente<sup>52</sup>. Esse sono impiegate per il raggiungimento di obiettivi energetici, quali la massimizzazione degli apporti solari e la minimizzazione delle dispersioni, ma anche per obiettivi di comfort visivo, quali il mantenimento di un illuminamento costante, la minimizzazione dei fenomeni di abbagliamento e tutela della privacy. In inglese sono denominate "*Switchable glazing*", dove con *switch* si intende il cambiamento delle proprietà del vetro, cambiamento che può essere di tipo on-off, graduale o continuo. Sostanzialmente si tratta di

<sup>52</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p. 36

finestre in cui il componente trasparente può cambiare tinta/colore o opacità mediante tecnologie cromogeniche<sup>53</sup>. Tali vetri vengono infatti definiti anche “vetri cromogenici”. Alcune aziende specializzate in questo campo hanno prodotto rivestimenti cromogenici applicabili su finestre esistenti, aumentando le possibilità dell’uso di tali tecnologie anche nell’ambito dei retrofit<sup>54</sup>.

I sistemi vetrati dinamici possono essere classificati in due tipologie:

- Tipo passivo: il materiale costituente il vetro o ad esso associato cambia le sue proprietà se esposto al calore o alla luce. Lo switch dunque non può essere modulato direttamente.
- Tipo attivo: le proprietà del sistema vetrato cambiano per uno stimolo esterno come un campo elettrico o la diffusione di calore o ioni. Lo switch può essere controllato e incide su caratteristiche diverse, quali l’assorbenza, la riflessione o lo scattering.<sup>55</sup>

### 1.10.1 TECNOLOGIE PASSIVE: PCM, TT, FC, TC

#### FINESTRA CON RIVESTIMENTO IN MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM)

Tali tipi di finestre presentano in intercapedine un rivestimento in materiali a cambiamento di fase (PCM- Phase Changing Materials); essi si presentano semitrasparenti allo stato liquido e traslucidi allo stato solido. Tali materiali sfruttano il calore latente accumulato o rilasciato nei cambiamenti di fase: se riscaldati infatti essi assorbono energia quando avviene il cambiamento di fase dallo stato solido a quello liquido; al contrario quando la temperatura dell’ambiente esterno cala rilasciano il calore accumulato nel precedente processo endotermico passando dallo stato liquido a quello solido. Dunque, agendo come elementi di accumulo energetico contribuiscono a far decrescere il carico di riscaldamento e raffrescamento dell’edificio<sup>56</sup>, e soprattutto ad attutire il momento di picco nella richiesta di energia agli impianti. Alcuni studi documentano che questa tecnologia diminuisce la temperatura superficiale interna e dell’ambiente interno rispettivamente di 2,7° e 1,4°, e fino al 57% la richiesta energetica invernale. I materiali a cambiamento di fase sono di tre tipi: eutettici, organici e inorganici; quello più usato è la paraffina, che tuttavia presenta una scarsa trasmissione nel campo del visibile<sup>57</sup>. Occorre selezionare adeguatamente in base alle condizioni climatiche e alle temperature di comfort termico desiderate l’adeguato intervallo di temperatura in cui avviene il cambiamento di fase e la capacità di assorbire e rilasciare calore.<sup>58</sup> Di norma la temperatura che innesca il cambiamento di fase viene progettata per valori di attivazione del riscaldamento, anche se è possibile portare tali temperature da - 10° a 90°C.

#### VETRO FOTOCROMICO

Tale tipo di vetro presenta un rivestimento in intercapedine costituito da un materiale fotocromico, di norma ossido di tungsteno,  $WO_x$ . Esso modifica le sue proprietà passando dallo stato trasparente a colorato in risposta alla variazione della quantità di raggi ultravioletti (UV) incidente su

<sup>53</sup> Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *supra*, nota 33, p. 215

<sup>54</sup> ChromoGenics, SmartWindows, retrieved 29 July 2010, /www.chromogenics.com/smart\_eng.htmS.

<sup>55</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p. 40

<sup>56</sup> Bjørn Petter Jelle, Andrew Hynd, Arild Gustavsen, Dariush Arasteh, Howdy Goudey, Robert Hart, *Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities*, in “ Solar Energy Materials and Solar Cells”, Volume 96, January 2012, pagg 8-9

<sup>57</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p. 40

<sup>58</sup> B. P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, R. Hart, *supra*, nota 56, p. 8

di esso. Tale switch, pur coinvolgendo la  $T_{vis}$  del materiale, incide in quantità decisamente ridotta sulla  $T_{sol}$ , risultando inefficace dal punto di vista energetico. Viene perciò utilizzato per ragioni di privacy nel campo dell'Automotive e per le lenti ottiche, ma non in campo edilizio. Inoltre spesso lo switch avviene per valori di Irradianza esageratamente bassi.

## VETRO TERMOTROPICO

I materiali termotropici, materiali sensibili al calore, sono di norma formati da una miscela di acqua e gas che risulta omogenea e trasparente alle basse temperature fino a una temperatura critica oltre la quale le due sostanze si separano formando uno strato opaco e diffondente. Di natura sono materiali dal comportamento passivo, tuttavia è possibile applicare un sottile strato resistivo al calore, formato da un sottile film metallico o di conduttori trasparenti, che riscaldato innesca il cambiamento di opacità grazie a un controllo elettrico e dunque attivo. Il funzionamento del vetro è binario, on-off, e a seconda del materiale di cui esso è composto è possibile settare una temperatura di switching che va da alcuni gradi sotto 0 a più di 50 °C. Dopo lo switch è possibile raggiungere valori di Trasmissione solare e visibile tra lo 0 e il 5%<sup>59</sup>. Il limite più evidente di tale tecnologia consiste nel totale abbattimento della trasmissione visibile conseguente allo switch, dunque essa viene utilizzato soprattutto per ragioni privacy e per evitare l'abbagliamento.

## VETRO TERMOCROMICO

Tale tipo di vetro presenta un rivestimento in materiale termocromico, ovvero un materiale che a seconda della variazione di temperatura cambia colore, e dunque la percentuale di radiazione solare trasmessa e assorbita. I rivestimenti termocromici più utilizzati sono costituiti da triossido di tungsteno o diossido di Vanadio ( $VO_2$ ), tuttavia ci sono casi in cui sono utilizzati polimeri. A seconda del materiale utilizzato varia la temperatura critica ( $\tau_c$ ), temperatura in cui inizia il processo di transizione delle proprietà del layer termocromico. La  $\tau_c$  del diossido di Vanadio è intorno a 68°, decisamente troppo elevata per essere efficace nella minimizzazione del consumo energetico, dunque esso viene unito a Tungsteno e Fluoro in modo da abbassare tale temperatura a valori idonei<sup>60</sup>. Quando la temperatura del vetro supera la temperatura critica il materiale assume una colorazione nel capo del visibile e dell'infrarosso, aumentando il coefficiente di riflessione e ostacolando l'entrata della radiazione all'interno dell'ambiente<sup>61</sup>. Si può identificare come indice dell'efficienza di un vetro termocromico l'intervallo  $\Delta T_{sol}$  tra la radiazione trasmessa prima e dopo il cambiamento. Esso deve superare lo 0,1. Tuttavia il cambiamento di colorazione, dipendendo dalla temperatura del vetro, avviene anche in giornate fredde ma con sole forte, causando una diminuzione di  $T_{sol}$  e  $T_{vis}$  anche nei momenti in cui sarebbe necessaria un'alta percentuale di apporti solari e di illuminazione naturale. Vi è anche un problema di isteresi: nel processo di andata, ovvero di colorazione del vetro, i valori registrati in corrispondenza di una certa temperatura superficiale non sono gli stessi del processo di ritorno, ma l'andamento della trasmissione solare e visibile segue due curve non sovrapponibili [Fig. 7].

<sup>59</sup> Carl M. Lampert, *Chromogenic smart materials*, in "Materialstoday", Volume 7, Issue 3, Marzo 2004, pagg 33-34

<sup>60</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p. 42

<sup>61</sup> Kunyapat Thummavichai, Yongde Xia, Yanqiu Zhu, *Recent progress in chromogenic research of tungsten oxides towards energy-related applications*, in "Progress in Materials Science", Vol 88, 2017, pagg 313-316

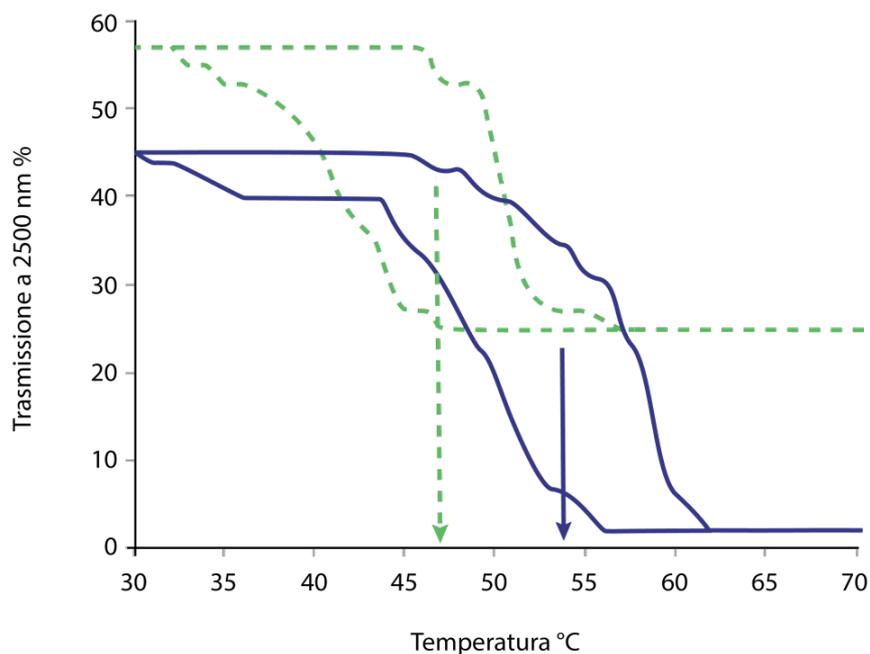


Fig 7

### 1.10.2 TECNOLOGIE ATTIVE: SPD, PLDC, ChLDC, GC, EC, PVC

#### VETRATE A TRASPARENZA VARIABILE (SPD)

Gli SPD (Suspended Particle Devices) sono materiali costituiti da due strati conduttivi e isolanti tra cui è presente un fluido organico. In esso sono sospese delle particelle bipolari caratterizzate da una forte anisotropia ottica. Quando viene applicato un voltaggio tali particelle, prima orientate casualmente, si allineano lungo una direzione rendendo trasparente il vetro. È possibile raggiungere diversi gradi di trasparenza con considerevole velocità a seconda del voltaggio applicato; tuttavia per mantenere tale condizione è necessario la continua alimentazione elettrica del componente. Lo stadio di trasparenza raggiungibile da tale materiale dipende dallo spessore dello strato del fluido e dalla densità delle particelle in esso sospeso: di norma la trasmissione visibile varia tra il 55% e l'1,5%. Il limite di tale tecnologia è il consumo elettrico necessario al mantenimento della condizione trasparente<sup>62</sup>.

#### VETRATE A CRISTALLI LIQUIDI (PLDCs e ChLCs)

Esistono due tipi di vetrate a cristalli liquidi: le cristalli liquidi in fase dispersa "PLDCs" (Phase Dispersed Liquid Crystals) e cristalli liquidi colesterici "ChLCs" (Cholesteric Liquid Crystals). Il funzionamento delle vetrate che utilizzano tale tecnologia è molto simile a quelle con particelle sospese. Tra due strati di materiale vetroso si trovano due layer conduttori trasparenti in poliestere o vetro che hanno la funzione di elettrodi. Al loro interno è presente una matrice polimerica, in cui sono dispersi in modo disordinato e non orientato le molecole di cristalli liquidi. Il vetro in tale stato risulta perciò opaco e di colore bianco poiché i cristalli deflettono i raggi luminosi in varie direzioni, non permettendo il loro passaggio. Il passaggio di corrente lungo i due elettrodi e la creazione di una tensione elettrica all'interno del vetro orienta i cristalli lungo una direzione, creando un'organizzazione ordinata delle molecole che permette il passaggio non ostacolato della luce e rende così il vetro trasparente. È necessario applicare un voltaggio di 24-120 V con

<sup>62</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrabi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p. 42

un'energia consumata pari a circa 20 W/m<sup>2</sup>, e una variazione di  $T_{vis}$  da 0,5 a 0,8<sup>63</sup>.

Anche in questo caso per mantenere la condizione di trasparenza è necessario applicare un voltaggio continuo, dunque le più recenti ricerche mirano a invertire il comportamento del vetro, utilizzando l'applicazione di un voltaggio per imporre una condizione di disordine ai cristalli e dunque rendere opaco il vetro<sup>64</sup>. I limiti di tale tecnologia consistono essenzialmente nel ridotto intervallo di trasmissione solare, nel consumo energetico dovuto al voltaggio necessario al mantenimento della trasparenza e nel costo del componente (di norma tra i 750 e i 950 \$/m<sup>2</sup>)<sup>65</sup>.

## GASOCROMICO

Una finestra gasocromica è formata da due lastre in vetro con una camera interna. Su una delle due lastre viene inserito un layer gasocromico, di norma ossido di tungsteno, su cui viene applicato un sottile strato catalizzatore costituito da metalli nobili quali Au, Pd e Pt. Quando un gas, di norma idrogeno H<sub>2</sub> (ma è possibile utilizzare anche O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> o Ar) viene inserito nella camera l'ossido di tungsteno reagisce cambiando colore e trasparenza a seconda del volume di idrogeno presente nella cavità. Per innescare il processo inverso occorre immettere ossigeno o altri gas dentro la cavità in modo da ritornare allo stato di trasparenza iniziale. L'intervallo di trasparenza raggiungibile va da 0.77 a 0.06<sup>66</sup>. Per ultimare la colorazione della finestra è necessaria una percentuale di idrogeno che raggiunga il 10%, percentuale comunque inferiore alla concentrazione che rende infiammabile la miscela<sup>67</sup>. Secondo gli studi di Feng et al. grazie a questa tecnologia si può raggiungere una riduzione di fabbisogno energetico in riscaldamento, raffrescamento e ventilazione del 28,4% rispetto a una lastra di vetro chiaro e dell'11,4% rispetto a una lastra colorata in un ufficio standard a Shanghai<sup>68</sup>. I limiti più evidenti di tale tecnologia consistono nella necessità di realizzare un impianto gas, a volte anche un piccolo generatore di gas, specifico per le finestre e tutti i collegamenti ad esso.

## VETRO ELETTROCROMICO

Tecnologia studiata dagli anni '70, un vetro elettrocromico è una lastra multistrato che sottoposta a un dato voltaggio vira da uno stato di trasparenza simile a un vetro normale a una colorazione intensa, di norma blu di Prussia. Il cambiamento di colore può avvenire con degli step graduali o in modo continuo, a seconda della corrente fornita al componente. Esso è composto da sette layer dove gli strati esterni in vetro racchiudono il sottilissimo film elettrocromico, a sua volta composto da 5 strati. In ordine troviamo un primo strato trasparente conduttore formato di norma da ossidi metallici; segue lo strato elettrocromico attivo formato da triossido di tungsteno; segue uno strato conduttore elettrolita e uno strato di stoccaggio di ioni formato da ossido di Nichel saturato con ioni di Litio; infine il secondo strato trasparente conduttore in ossidi metallici. Quando al vetro viene applicato un voltaggio (inferiore a 5V) i due strati trasparenti conduttori si comportano come catodo e come anodo e gli ioni positivi di Litio per effetto del

<sup>63</sup> Carl M. Lampert, *Chromogenic smart materials*, in "Materials today", Volume 7, Issue 3, Marzo 2004, pag 33

<sup>64</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p

<sup>65</sup> Carl M. Lampert, *supra*, nota 63, p. 33

<sup>66</sup> Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *supra*, nota 27, p. 42

<sup>67</sup> Carl M. Lampert, *Chromogenic smart materials*, in "Materialstoday", Volume 7, Issue 3, Marzo 2004, pag 34

<sup>68</sup> W. Feng, L. Zou, G. Gao, G. Wu, J. Shen, W. Li, *Solar energy materials & solar cells gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis*, in "Sol. Energy Mater. Sol. Cells, volume 144, 2016, pagg 316–323

campo elettrico creatosi migrano attraverso lo strato conduttore elettrolita e si uniscono nello strato attivo agli elettroni immessi nel circuito causando una reazione di ossidazione e formando una sostanza dal colore blu intenso. Tale fenomeno è reversibile invertendo il ruolo di catodo e anodo. Grazie a cambiamento di colore della lastra variano le prestazioni energetiche e visive del vetro, in particolare aumenta la quantità di radiazione solare riflessa e assorbita dalla lastra, e in tal modo diminuisce notevolmente la percentuale di radiazione solare e visibile trasmessa. Non è necessario continuare ad applicare il voltaggio per mantenere lo stato di colorazione desiderato: il consumo elettrico del vetro si riduce al momento dello switch. Le ultime ricerche hanno prodotto vetri elettrocromici che virano anche su tinte diverse dal blu, come il grigio, colore meno disturbante a livello percettivo. Esso trova applicazione non solo a livello di edificio, ma anche nel settore automobilistico, aerospaziale ed informatico.

La trasmissione visibile di questo tipo di vetro varia dall'1% fino all'80% per una lastra singola. Nel caso esaminato a livello sperimentale e da simulazione l'intervallo di variazione risulta da catalogo 8-77%.

Esistono tuttavia alcune criticità rispetto a tale tecnologia: l'accumularsi di ioni che interferiscono nel processo può causare la diminuzione di trasmissione visibile e solare, inoltre il tempo di switch a volte risulta troppo lungo e la lastra risulta sensibile alle condizioni climatiche estreme<sup>69</sup>.

#### **VETRO FOTOVOLTACROMICO (PVC)**

(DSSC dye sensitized solar cell electrode<sup>70</sup>)

Le finestre fotovoltacromiche sono in grado di modulare la trasmissione visibile e allo stesso tempo generare corrente elettrica grazie alla percentuale di energia di cui si vuole impedire il passaggio all'interno dell'ambiente integrando la tecnologia elettrocromica e quella fotovoltaica. Ultimamente le ricerche hanno studiato la produzione di celle fotovoltaiche connesse con un liquido conduttore, potenzialmente più economiche e di semplice fabbricazione rispetto alle tradizionali<sup>71</sup>. Questa tecnologia nasce dalle celle fotoelettrocromiche, celle formate da due strati che fungono da elettrodi, di cui uno è fotovoltaico e il secondo elettrocromico e separate da uno strato elettrolita. Il primo strato fornisce corrente per lo switch del secondo. Da tali tipi di celle nascono le celle fotovoltacromiche (PVCC) che uniscono al comportamento fotoelettrocromico (dunque all'autoalimentazione) la produzione di energia elettrica con il processo fotovoltaico.

### **1.11 CRITICITÀ DELLE SMART WINDOWS**

La tecnologia delle finestre cromogeniche presenta tuttavia non poche criticità, che ne hanno impedito l'ingresso su grande scala nel mercato. Prima di tutto il costo, che sul prodotto finale risulta quasi doppio rispetto a una finestra tradizionale, e di molto superiore anche ai vetri selettivi top di gamma. Inoltre spesso le prestazioni registrate dal punto di vista prettamente tecnico sono equiparabili o peggiorative rispetto alle tecnologie tradizionali di ombreggiamento (veneziane). Esse risentono più delle tecnologie tradizionali delle condizioni di stress e presentano una durabilità inferiore, soprattutto se sottoposte a cambiamenti ciclici ripetuti. Un altro problema di

<sup>69</sup> Kunyapat Thumavichai, Yongde Xia, Yanqiu Zhu, *Recent progress in chromogenic research of tungsten oxides towards energy-related applications*, in "Progress in Materials Science", vol 88, 2017, pag 308

<sup>70</sup> Alessandro Cannavale, Michele Manca, Francesco Malara, Luisa De Marco, Roberto Cingolania, Giuseppe Gigli, *Highly efficient smart photovoltachromic devices with tailored electrolyte composition*, in "Energy and Environmental Science", Volume 4, Issue 7, Luglio 2011, pag 2567

<sup>71</sup> A. Cannavale, M. Manca, F. Malara, L. De Marco, R. Cingolania, G. Gigli, *supra*, nota 70, pag 2568

cui tenere conto è la non immediata risposta agli stimoli: nel caso di una finestra elettrocromica lo switch dallo stadio di completa trasparenza a quello di completa colorazione può impegnare diversi minuti (fino a 20). In tutti questi ambiti la ricerca sta procedendo per risolvere o ridurre le criticità riscontrate.

Occorre però sottolineare che rispetto alle tecnologie tradizionali molte delle Smart Windows presentate portano a un miglioramento del benessere visivo non misurabile e quantificabile scientificamente: il passaggio della luce naturale e il contatto visivo con l'ambiente esterno sono alcune delle potenzialità mantenute da tale tipo di tecnologia.

### **1.12 ALTRE APPLICAZIONI DEI VETRI CROMOGENICI**

Alcuni vetri cromogenici trovano un'applicazione non limitata al campo dell'edilizia, ma sono stati e sono attualmente utilizzati anche nel settore informatico, navale, dell'automotive e dell'aircraft. Infatti il loro funzionamento permette di migliorare non soltanto le prestazioni energetiche del componente trasparente, ma anche quelle visive, evitando problemi di abbagliamento e privacy. In particolare secondo uno studio di Lampert<sup>72</sup> il 10% del mercato dei vetri cromogenici viene utilizzato nel settore automobilistico come vetro antiabbagliamento. Inoltre nel settore aeronautico vengono utilizzati per controllare l'abbagliamento di piloti e passeggeri, raggiungendo trasmissioni del 1% nel campo del visibile. Anche nel settore informatico vengono utilizzati per i display di molti prodotti elettronici, dei libri digitali e della pubblicità.

### **1.13 APPROCCIO DI RICERCA SUI VETRI CROMOGENICI E CRITICITÀ DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE**

Le recenti ricerche sui vetri cromogenici, sullo studio delle loro prestazioni, dei campi di possibile miglioramento e delle strategie ottimali per il loro controllo sono state approfondite soprattutto negli ultimi venti anni da ricercatori sparsi in tutto il mondo.

Esistono sostanzialmente tre approcci di studio in tale campo, esaminati da Favoino<sup>73</sup> nel suo lavoro riguardante l'adaptive glazing

- approccio teorico, in cui le proprietà di un vetro pensato per essere inserito in uno specifico edificio sono identificate mediante un processo deduttivo, ma non sono verificate con dell'attività sperimentale o mediante simulazione. Dunque tali proprietà risultano essere le ottimali solo nel caso particolare preso in considerazione.

- approccio diretto: tale approccio si fonda usualmente sul dialogo di due parti fondamentali: la prima è una parte strettamente sperimentale, basata sull'analisi del comportamento di un modello reale o da simulazione in diversi scenari. Lo studio dei risultati di tale analisi sono materia per ipotizzare delle azioni di miglioramento o una strategia di controllo. Segue la valutazione delle prestazioni del sistema analizzato in seguito a tali applicazioni. Tale è la strategia utilizzata nel seguente lavoro di tesi.

- approccio inverso: basato su un processo induttivo, tale approccio pone il suo punto di partenza su un'analisi di minimizzazione o massimizzazione di una funzione di costo. Essa può coinvolgere come fattori consumo di energia e/o comfort. Da essa si risale alle proprietà necessarie

<sup>72</sup> Carl M. Lampert, *Chromogenic smart materials*, in "Materialstoday", Volume 7, Issue 3, Marzo 2004, pagg 29-30

<sup>73</sup> Fabio Favoino, Mauro Overend, Qian Jin, *supra*, nota 23, p. 4

per il componente.

L'approccio utilizzato dal gruppo di ricerca è un approccio diretto, che ha avuto inizio logicamente e cronologicamente dallo studio dei modelli reali di vetri cromogenici montati in un ambiente specifico e nello scenario reale delle condizioni climatiche e ambientali del Politecnico di Torino, ed è proseguito con l'analisi simulativa su diverse città. In seguito alle analisi di caratterizzazione dei componenti, alle prime simulazioni e allo studio della letteratura esistente nel campo, sono state elaborate diverse strategie di controllo del componente elettrocromico e ne è stata valutata l'efficacia in diversi siti e secondo diversi obiettivi.

Come sottolineato da Favoino, una delle criticità di tale approccio consiste nel fatto di valutare uno specifico componente e una specifica strategia di controllo; manca dunque nel dare una panoramica generale oggettiva delle prestazioni e del controllo ottimale di un componente cromogenico. Per quanto riguarda la parte sperimentale il componente utilizzato presenta diverse problematiche dovute all'obsolescenza del controller utilizzato per lo switch.

Un'altra criticità presente a livello generale in tutti le operazioni di ricerca sperimentale consiste nel doversi rapportare a un sistema esterno estremamente variabile: l'ambiente esterno. Esso risulta essere estremamente dinamico non solo su piccola scala, giornaliera e persino oraria, ma anche su larga scala, annuale e decennale. I dati climatici variano di giorno in giorno, di settimana in settimana e di anno in anno. Dunque lo studio effettuato su un ristretto periodo temporale e stagionale possono essere considerati solamente l'incipit per un più completo e realistico lavoro esaminato a su una scala temporale prolungata.

M.N. Assimakopoulos e altri<sup>74</sup> hanno condotto l'attività sperimentale per approssimativamente due anni. L'attività sperimentale esaminata nella tesi è invece localizzata nel periodo di pochi mesi. La parte simulativa può coprire questa mancanza permettendo un'analisi simulata su periodi lunghi, tuttavia risulta solo parzialmente aderente alla variabilità ambientale reale, e difetta di un'interessante parte di valutazione fisica ed esperienziale delle concrete condizioni di comfort o discomfort.

Le difficoltà derivanti dall'interfacciarsi con un sistema non prevedibile e variabile quale l'ambiente esterno sono acuite dalla ugualmente dinamica caratterizzazione dei sistemi analizzati. La complessità di tale dialogo rende così necessaria l'utilizzazione di logiche di controllo basate su algoritmi e fuzzy sistem<sup>75</sup>, ma l'identificazione di tali logiche di controllo in fase teorica è particolarmente complessa, considerando la varietà di parametri ambientali in gioco.

Sono infine da citare le naturali problematiche sperimentali affrontate nel periodo di analisi quali le due interruzioni elettriche che hanno causato la cancellazione dei dati acquisiti e il malfunzionamento dell'impianto di raffrescamento necessario all'acquisizione di dati uniformati; inoltre il malfunzionamento del componente di controllo del vetro elettrocromico.

---

<sup>74</sup> M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino, *Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies*, in *Building and Environment*, vol. 42, 2007 pagg 2829–2834

<sup>75</sup> M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino, *supra*, nota 74, pag 2831

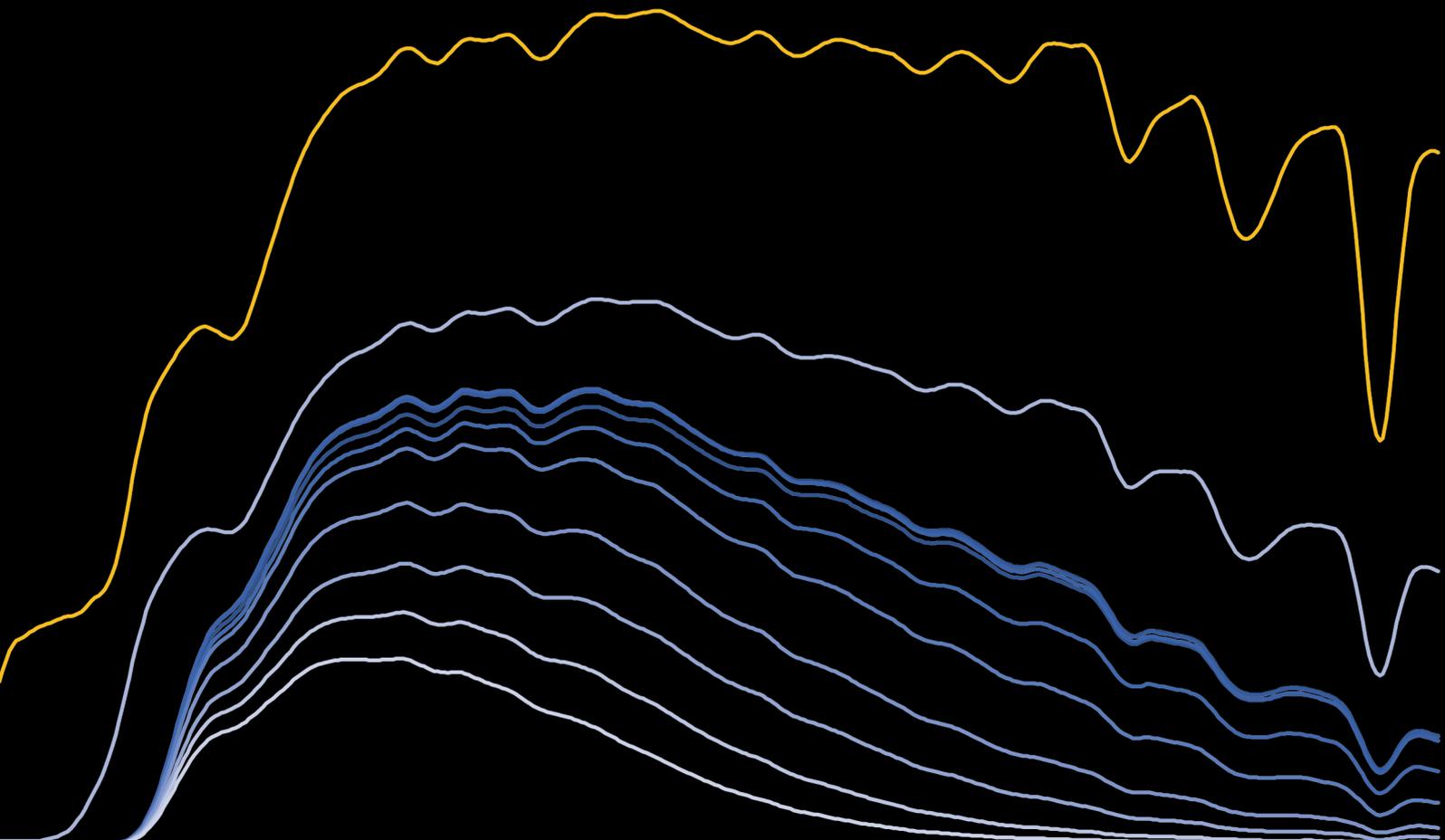


## CAPITOLO 2

### DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE

L'analisi sperimentale nasce con l'obiettivo di testare sul campo il comportamento del vetro elettrocromico dal punto di vista energetico e di comfort termico. Con lo sviluppo del tema di tesi essa si sposta sulla caratterizzazione in loco dei sistemi trasparenti a livello energetico e visivo e sullo studio del loro comportamento in base ai cambiamenti climatici. I dati raccolti sono stati utili alla validazione del modello e alla costruzione dei modelli per la parte di simulazione.

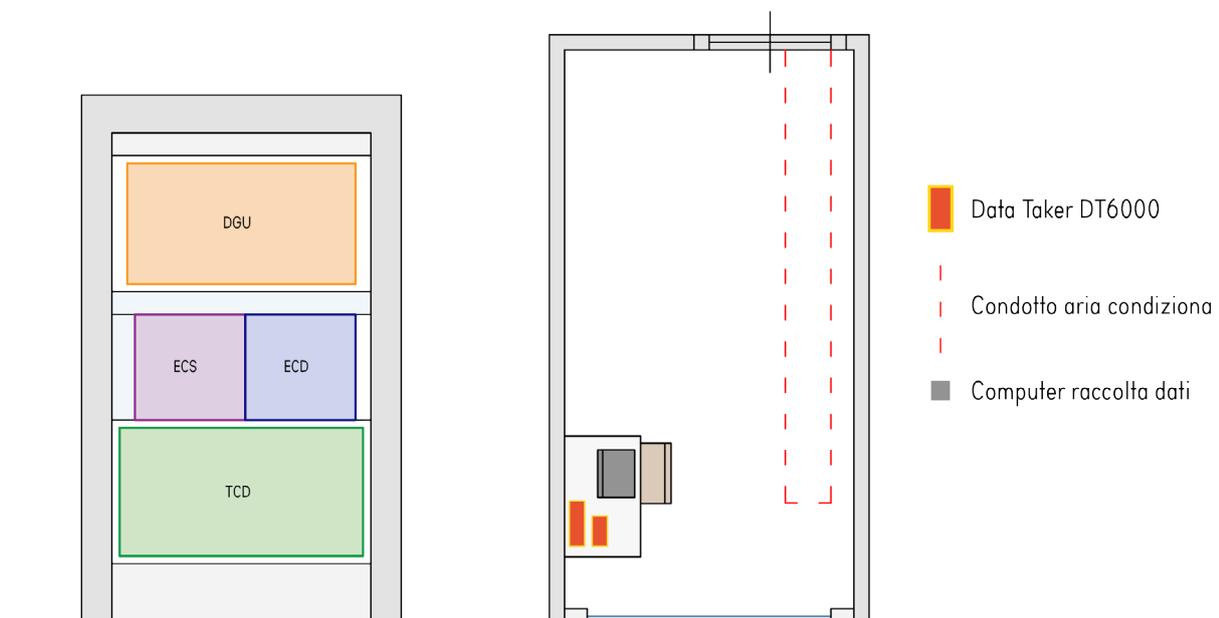
L'analisi è stata condotta nei periodi estivo, autunnale e invernale (settembre 2017 - febbraio 2018) nella città di Torino.



## 2.1 ORGANIZZAZIONE DEL SITO

I sistemi analizzati sono stati montati sulla facciata verticale di una delle due celle gemelle posta sul tetto del Dipartimento Energia DENERG, nella sede del Politecnico di Torino. La cella ha base rettangolare ed è formata da tre pareti verticali, pavimento e copertura coibentati e adiabatici. La quarta parete verticale permette il montaggio di tamponamenti trasparenti o opachi. La cella ha dimensioni esterne 1.90 \* 3.80 m ed è rivolta con asse longitudinale Nord-Sud. Le facciate con superficie minore sono esposte a Nord e a Sud; nella facciata Nord si trova la porta che permette di accedere al gabbiotto. La facciata con esposizione a Sud si trova in condizioni di non ombreggiamento da elementi esterni. Su tale facciata sono stati installati tre telai su cui si è effettuato il montaggio delle quattro diverse tipologie di sistemi vetrati descritti successivamente:

- Vetro chiaro doppio con argon, lastra esterna 6 mm, camera 15 mm, vetro interno con rivestimento basso-emissivo (low-e). Denominazione utilizzata: DGU
- Vetro termocromico doppio con camera argon, lastra esterna termocromica 7 mm, camera 15 mm, vetro interno con rivestimento basso-emissivo (low-e). Denominazione utilizzata: TCD
- Vetro elettrocromico GESIMAT doppio con camera argon, lastra esterna elettrocromica 9 mm, camera 15 mm, vetro interno con rivestimento basso-emissivo (low-e). Denominazione utilizzata: ECD
- Vetro elettrocromico singolo GESIMAT, 9 mm. Denominazione utilizzata: ECS



## 2.2 SET-UP SPERIMENTALE

Predisposte le vetrate si è proceduto con l'installazione dei sensori esterni ed interni ed al loro collegamento al Data Taker. Sulla superficie di ogni sistema vetrato sono state montate tre termocoppie esterne e tre termocoppie interne, un termoflussimetro e un piranometro. Inoltre sono state predisposte tre termocoppie interne in diverse posizioni per registrare la temperatura

dell'aria interna a diverse altezze e una termocoppia esterna in zona ombreggiata per misurare la temperatura dell'aria esterna. Infine un piranometro posto ad altezza centrale sul telaio esterno registra l'irradianza esterna incidente sulla facciata della cella. I piranometri interni sono stati posizionati più vicini possibile alla superficie vetrata considerata, per ridurre al massimo l'influenza del fattore di vista. Tuttavia, date le ridotte dimensioni della cella, tale fattore ha influenzato perceptibilmente i risultati ottenuti, come sarà possibile esaminare successivamente. In totale sono stati collegati 33 canali al Data Taker DT600, collegato a un Computer Portatile mediante cui si operano il controllo, il monitoraggio e lo scaricamento dei dati. I software utilizzati per il trattamento dei dati sono DeTransfer e DeLoad; successivamente essi sono su elaborati sul software di calcolo Excel.



Dato che i quattro sistemi vetrati vedono porzioni di volta celeste diverse, fattore dovuto al loro posizionamento fisico su tre livelli diversi, prima dell'inizio dell'acquisizione dei dati è stato ritenuto opportuno verificare l'incidenza delle differenti condizioni dei vetri. La cella poggia su una pavimentazione da esterno in materiale di colore chiaro con indice di riflessione decisamente maggiore in confronto a quello della volta celeste. Onde evitare ripercussioni e influenze dovute a tale elemento nella misurazione dei dati riguardanti Irradianza e dei parametri visivi, si è ovviato al problema posizionando un tessuto di colore nero sulla pavimentazione antistante la cella. Successivamente posizionando tre piranometri esterni in corrispondenza del centro di ogni vetrata è stata verificata la coerenza dei dati ricevuti, in modo da poter escludere eventuali distorsioni dei risultati dovuti alla non omogeneità delle condizioni esterne delle vetrate. In seguito a tale verifica è partita l'acquisizione dei dati.

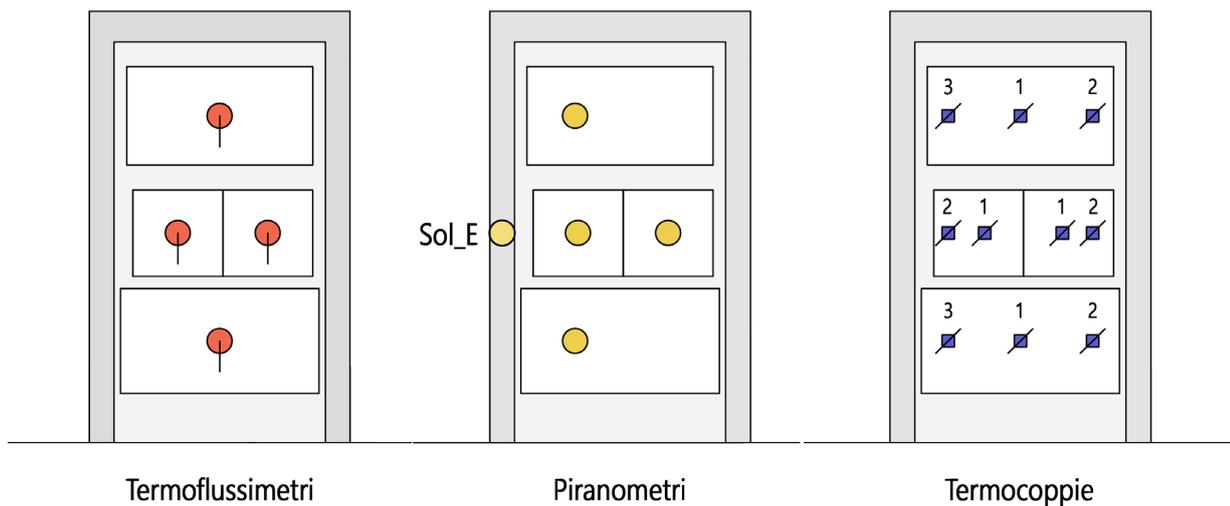
Sono state misurate le seguenti grandezze:

- Radiazione solare (Irradianza) trasmessa internamente in corrispondenza del centro di ogni vetrata;
- Temperature superficiali interne delle quattro lastre vetrate in tre punti selezionati;
- Temperature superficiali esterne delle quattro lastre vetrate in tre punti selezionati corri-

- spondenti ai tre punti selezionati internamente;
- Temperatura dell'aria interna all'ambiente in tre diverse altezze e posizioni;
- Temperatura dell'aria esterna in zona ombreggiata;
- Irradianza esterna sul piano verticale Sud;
- Flussi termici trasmessi attraverso i quattro sistemi vetrati nella facciata Sud;

L'acquisizione dei dati è stata programmata ogni 15 minuti; tali dati sono stati registrati sul Data Taker e periodicamente scaricati ed analizzati.

In figura è possibile identificare la posizione dei sensori.



## GRANDEZZE AMBIENTALI MONITORATE:

SOL\_E: Irradianza incidente sulla parete verticale esterna;

TAE: Temperatura dell'aria esterna, misurata in zona ombreggiata e parzialmente protetta dal vento;

TAI\_1; TAI\_2; TAI\_3: temperatura dell'aria interna all'ambiente misurate a diverse altezze e posizioni.

SOL\_I: Irradianza entrante misurata in centro vetrata

HF\_I: Flusso termico misurato in centro vetrata

TSE\_1; TSE\_2; TSE\_3: temperature superficiali esterne misurate nel punto centrale (1) e negli estremi centrali (2;3) della lastra esterna.

TSI\_1; TSI\_2; TSI\_3: temperature superficiali interne misurate nel punto centrale (1) e negli estremi centrali (2;3) della lastra interna.

**Irradianze:** misurate mediante l'ausilio di piranometri ( $W/m^2$ ). Incertezza= +-3%

**Flussi termici:** misurati mediante l'ausilio di termoflussimetri ( $W/m^2$ ) Incertezza= +-5%

**Temperature superficiali:** misurate mediante l'ausilio di termocoppie ( $^{\circ}C$ ) Incertezza: 0,3  $^{\circ}C$

Le grandezze precedentemente indicate sono utili a quantificare le prestazioni energetiche dei sistemi vetrati analizzati. In particolare sono stati considerati i due tipi di apporto energetico interno all'ambiente: il primo apporto è quello dovuto alla radiazione solare che si trasmette

attraverso la vetrata all'interno dell'ambiente e comprende la radiazione solare diretta e quella diffusa dalla volta celeste, dalle nuvole e dagli oggetti presenti. Essa è misurata attraverso i piranometri interni. Il secondo apporto energetico è quello dovuto al calore che si trasmette internamente grazie ai processi di conduzione, convezione e irraggiamento attraverso la vetrata. Esso è formato in parte dalla quota di calore trasmesso per conduzione e convezione dovuto alla differenza di temperatura tra un ambiente e l'altro: nel periodo estivo la maggiore temperatura esterna porta a un flusso di calore verso l'interno dell'ambiente condizionato; nel periodo invernale la situazione si inverte e il flusso di calore risulta uscente dall'ambiente condizionato a temperatura maggiore verso l'esterno. A tale flusso si aggiunge la quota di calore derivante dall'incidenza della radiazione solare sul vetro. La radiazione incidente sull'elemento trasparente viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa all'interno. La quota riflessa si disperde nell'ambiente esterno; la quota trasmessa è misurata dai piranometri. La quota assorbita e ri-emessa internamente viene misurata, combinata con la parte dovuta al delta di temperatura, dai termoflussimetri. Tali strumenti infatti misurano l'apporto dovuto alle lunghezze d'onda elevate (*long wave*). Per ottenere dunque il bilancio complessivo dell'energia entrante o uscente dell'ambiente occorre sommare i due apporti. Mentre l'apporto dovuto alla radiazione solare è sempre positivo, l'apporto del flusso termico può essere positivo o negativo a seconda delle condizioni climatiche esterne. Si assume come positivo un flusso di calore entrante nell'ambiente interno e come negativo un flusso uscente da ambiente interno verso esterno.

## RACCOLTA DATI

Le misure dal 13 Settembre al 4 Ottobre, effettuate in una condizione di *free running*, sono state utilizzate per impostare la metodologia di analisi dei dati. Nella parte di elaborazione dei dati è stato possibile utilizzare le Irradianze esterne ed interne, ma non le temperature superficiali e i flussi termici: infatti la temperatura interna alla cella in tale periodo è salita fino ai 43° a causa delle ridotte dimensioni dell'ambiente e alle alte Irradianze esterne.

Dal 10 Ottobre 2017 al 21 Dicembre 2017, con cella condizionata, il vetro Elettrocromico è stato settato a intervalli non regolari su stadi di colorazione differenti basati sulle condizioni climatiche esterne (trasparenza nelle settimane a prevalenza nuvolosa e colorazione nelle settimane con tempo prevalentemente sereno). Questo ha permesso una prima indagine del comportamento dei vari sistemi vetrati a seconda delle diverse condizioni atmosferiche e per i sistemi con lastra elettrocromica a seconda del settaggio di colorazione.

Nei giorni 23, 27 e 30 Novembre, 7 Dicembre il vetro Elettrocromico è stato settato *step by step* sui 10 diversi stadi di colorazione per verificare le trasmissioni solari caratterizzanti i diversi stadi. Tale procedimento ha identificato il malfunzionamento del controller dell'elettrocromico, che non permette un settaggio regolare dello stadio di colorazione. Dunque i ragionamenti successivi vengono affrontati non in base allo stadio di colorazione identificato dal controller, ma in base ai valori di trasmissione solare misurati dai sensori.



## SUDDIVISIONE ANALISI PER CONDIZIONE CLIMATICA

La successiva analisi e rielaborazione dei dati è partita dalla distinzione e suddivisione generale dei dati per condizione climatica. Le misure sono state raggruppate in tre insiemi: giornate totalmente serene, giornate a prevalenza serena con presenza di nubi e velature, giornate con cielo coperto. L'insieme che ha permesso l'indagine maggiormente corretta e omogenea delle prestazioni dei vetri è l'insieme delle giornate totalmente serene, dove i valori di Irradianza seguono un andamento a campana con salita e discesa omogenea. Le giornate parzialmente nuvolose, a causa della e quelle coperte permettono dei ragionamenti a livello generale sul comportamento dei vetri, sul loro settaggio e sulla loro efficacia a livello energetico e visivo.

L'influenza dell'Irradianza esterna sulle prestazioni delle diverse tipologie di sistema vetrato è fondamentale, in particolare per il sistema vetrato con lastra termocromica, come sarà possibile approfondire successivamente.

I dati di trasmissione solare sono presentati come media considerando l'intervallo di tempo 9:30 - 15:00, dove il coefficiente angolare della curva della trasmissione solare risulta circa omogeneo. Confrontando il valore ottenuto da tale media con quello mediano si è potuta verificare la grande somiglianza dei due valori.

### 2.3 SET-UP - CARATTERIZZAZIONE DEI COMPONENTI

Con *set up* definiamo tutti i processi e le azioni volte alla caratterizzazione termica e visiva del vetro elettrocromico. A questi si accompagnano le caratterizzazioni del vetro chiaro e del vetro termocromico, se pur condotte con minore specificità.

#### FREE RUNNING

A causa del malfunzionamento del sistema di raffrescamento della cella i dati sono stati acquisiti in modo non regolarizzato per un periodo di tempo prolungato nel mese di Settembre e nei mesi invernali tra Dicembre e Marzo. Tale condizione, che nell'immediato pareva essere limitante allo scopo della sperimentazione, ha invece permesso l'interessantissima analisi della variazione dei parametri termici e del comportamento dei sistemi trasparenti in base alle condizioni climatiche al contorno.

#### 2.3.1 C (conduttanza) e U (trasmittanza termica)

Per calcolare le conduttanze termiche dei tre sistemi vetrati statici sono stati utilizzati i dati dei flussi termici notturni e la differenza di temperatura tra la lastra esterna del vetro e quella interna. Applicando una regressione semplice lineare al grafico estrapolato con questi dati si ottiene un'equazione dove il coefficiente di  $x$  indica il valore di conduttanza. Inoltre è possibile estrarre il parametro  $R^2$  che indica l'affidabilità della misura ottenuta. Un buon coefficiente  $R^2$  si trova tra lo 0,9 e 1. Si è osservato come i dati misurati risultino in alcuni casi estremamente variabili e come solo grazie ad una adeguata selezione presentino valori di affidabilità prossimi allo standard. Nonostante ciò è possibile registrare valori ricorrenti associati ai più alti coefficienti  $R^2$  estratti: tali valori vengono considerati come i più probabili.

Per il DGU nella maggior parte dei casi il valore della conduttanza estratta si trova tra 1,6 e 1,7

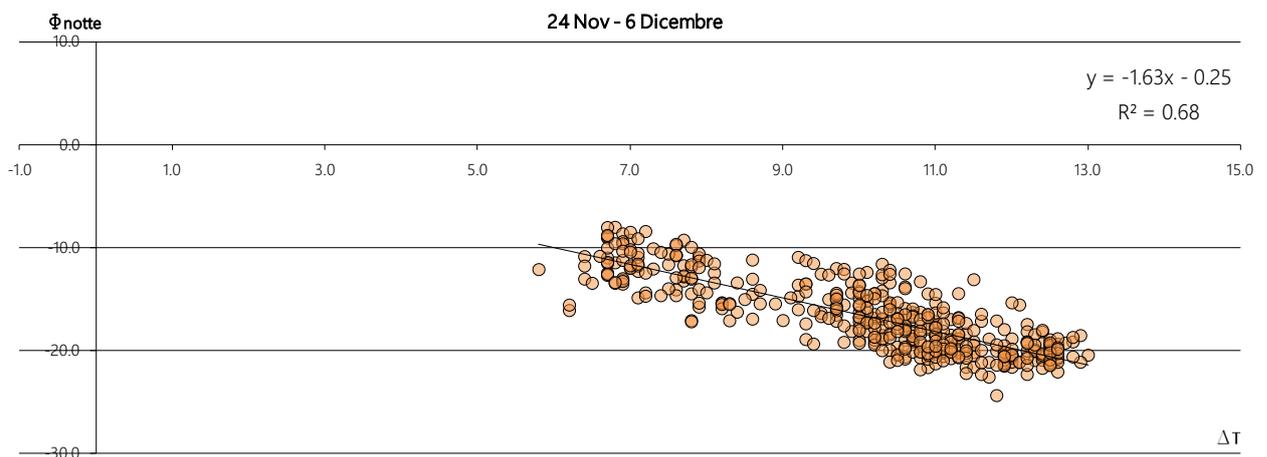
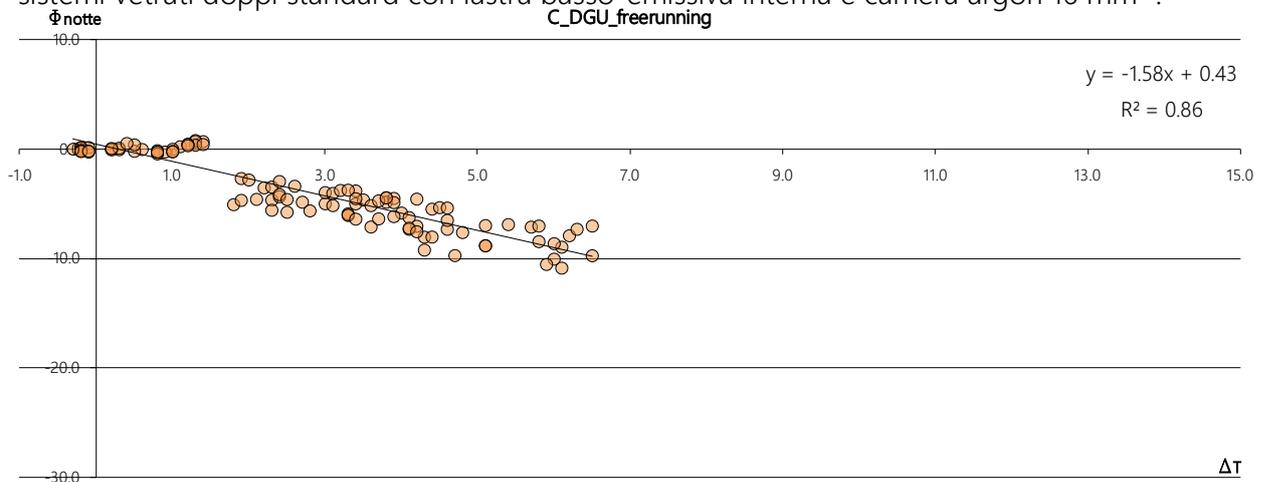
W/m<sup>2</sup>K. Per ottenere il valore di trasmittanza occorre trasformare la conduttanza in resistenza invertendola e sommarla alle resistenze liminari. Invertendo il risultato così ottenuto si estrae il

$$U = \frac{1}{R_{se} + \left(\frac{1}{C}\right) + R_{si}} = \frac{1}{0.04 + 0.625 + 0.13} = \frac{1}{0.795} = 1,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$C = 1,7$$

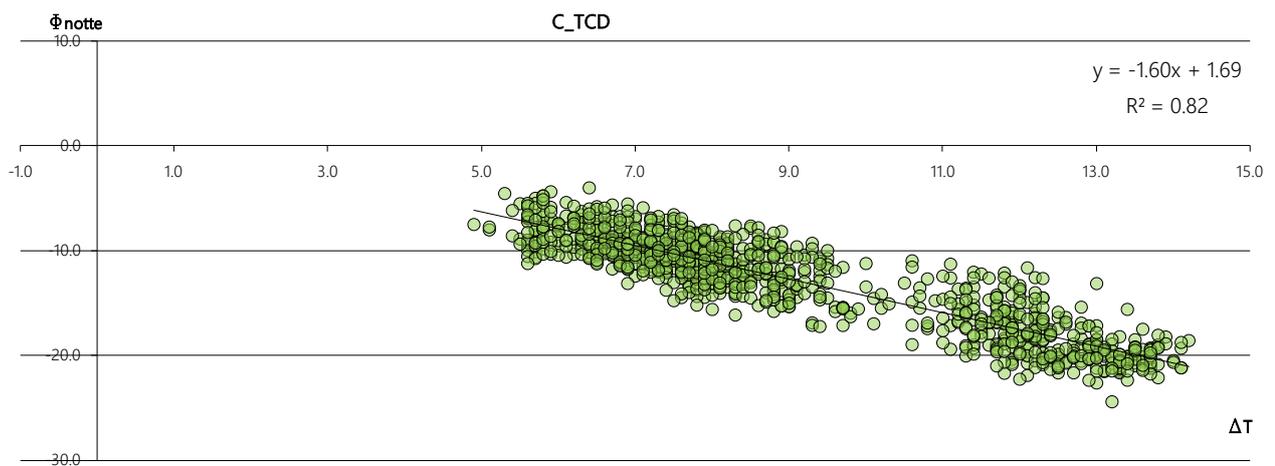
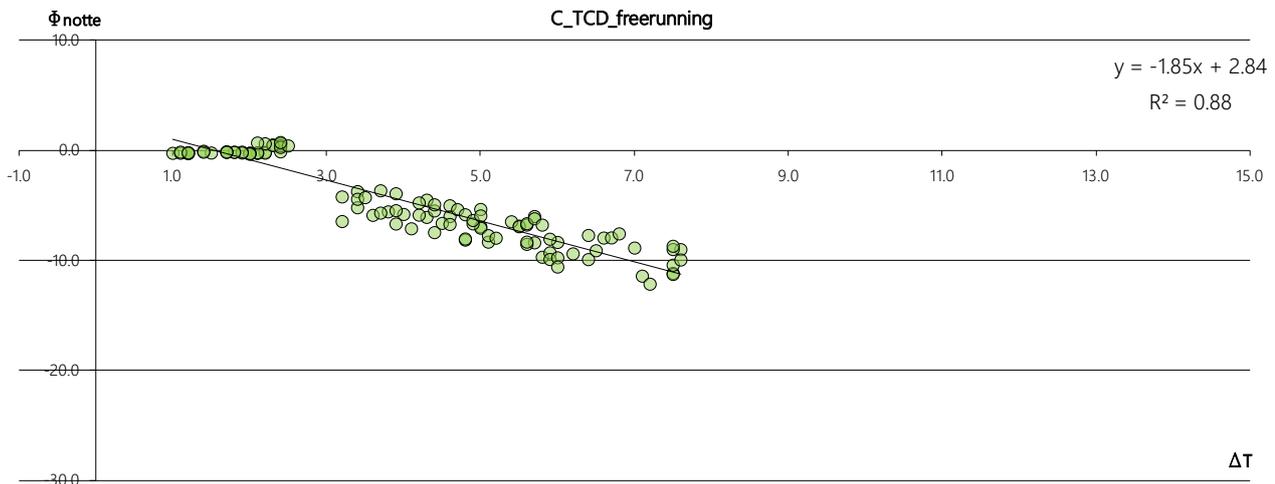
$$U = \frac{1}{R_{se} + \left(\frac{1}{C}\right) + R_{si}} = \frac{1}{0.04 + 0.588 + 0.13} = \frac{1}{0.758} = 1,32 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Il valore di trasmittanza ottenuto, compreso tra 1,26 e 1,32, risulta appena superiore a quello dei sistemi vetriati doppi standard con lastra basso-emissiva interna e camera argon 16 mm<sup>76</sup>.

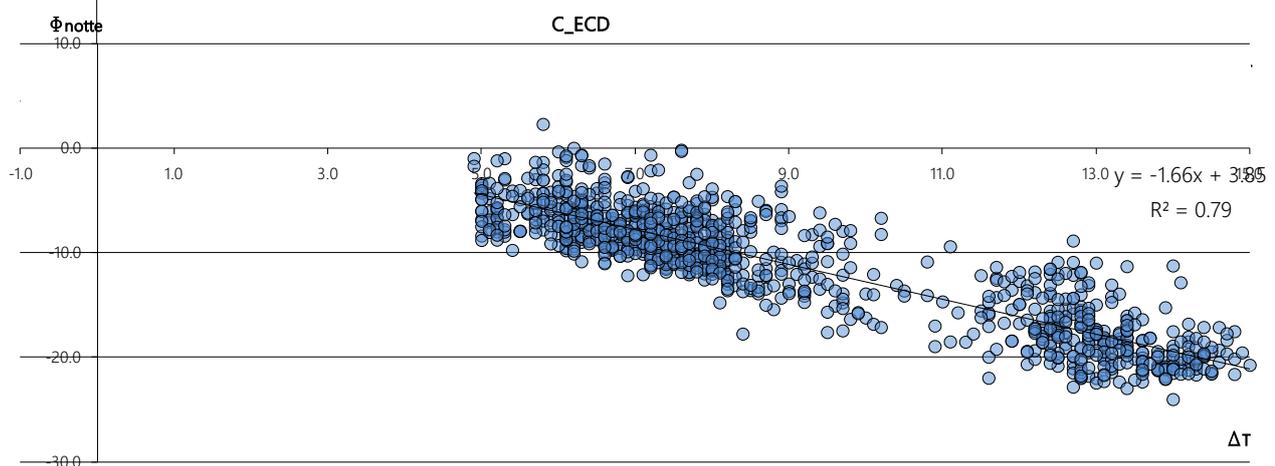
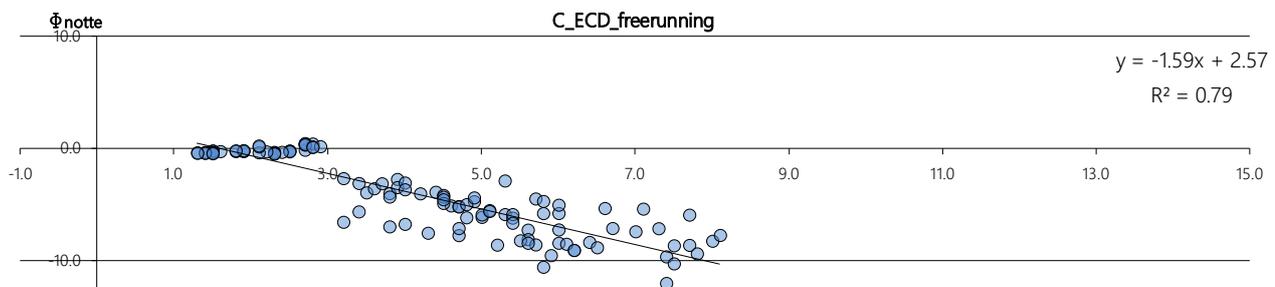


Nel caso del TCD in generale la variabilità dei dati risulta minore rispetto all'esempio precedente. Il valore di conduttanza si attesta sempre intorno a 1,6 - 1,7 W/m<sup>2</sup>K, valore che può dare maggiore conferma anche all'ipotesi di trasmittanza riguardante il DGU, dato che la dimensione della camera, il contenuto dell'intercapedine (Argon) e la seconda lastra in vetro-chiaro con rivestimento basso-emissivo sono identici. Ugualmente la trasmittanza si troverà tra 1.26 e 1.32.

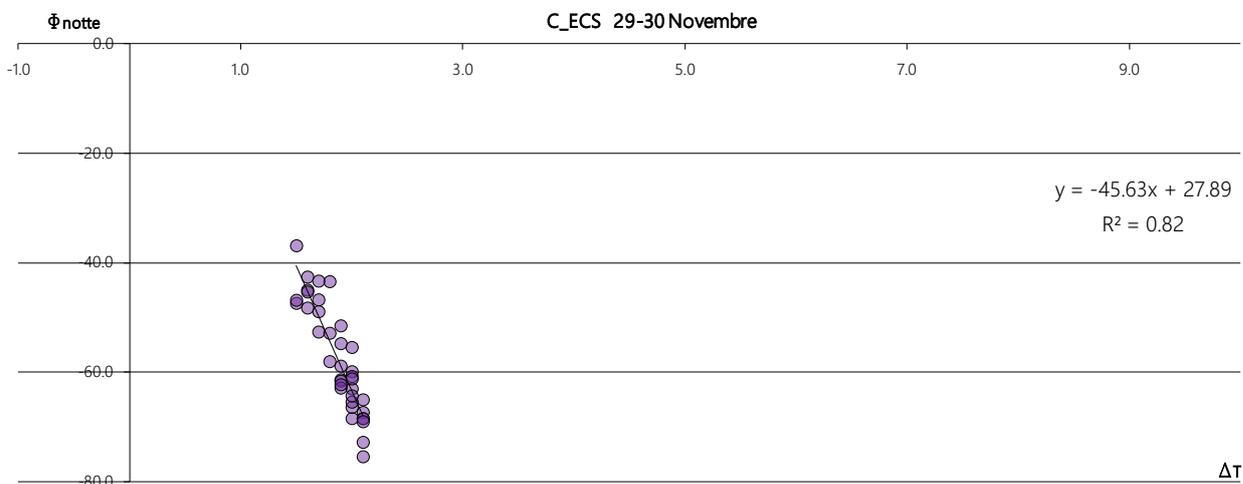
<sup>76</sup> Vedere pag 20



Nel caso dell'ECD si può osservare una lievemente inferiore affidabilità del risultato rispetto al caso del vetro termocromico. Di nuovo i valori di conduttanza si attestano intorno a 1,6 - 1,7 W/m<sup>2</sup>K e la conseguente trasmittanza varia tra 1,26 e 1,3.



Infine i valori di conduttanza estratti dai dati dell'ECS mostrano un maggiore variabilità, pur presentando un coefficiente  $R^2$  abbastanza alto. I valori di conduttanza variano tra 33 e 45, con coefficienti di affidabilità che vanno da 0.6 a 0.83. Trasformando le conduttanze nelle rispettive trasmittanze con il processo prima presentato si ottengono valori di Trasmittanza compresi tra 4.9 e 5.2  $W/m^2K$ , valori coerenti con gli standard di trasmittanza per lastre singole<sup>77</sup>.



## 2.2.2 FATTORE SOLARE

Per il calcolo del fattore solare ( $g$ ) è stata utilizzata la seguente metodologia, già sperimentata in campo per altre campagne di misurazione. Per calcolare il fattore solare occorre considerare la quantità  $I_{en}$  di energia entrante grazie alla radiazione solare (misurata mediante l'ausilio del piranometro come irradianza entrante in corrispondenza di ogni sistema vetrato, in alternativa calcolabile come  $T_{sol} * I_{out}$ ) e la quantità  $q_i$  di energia re-irraggiata all'interno dell'ambiente dal vetro a causa del riscaldamento dello stesso dovuto alla radiazione incidente. Tale valore viene registrato dal termoflussimetro interno unito al valore di calore trasmesso per conduzione e convezione dal sistema (UDT). Per estrarre il valore  $q_i$  è sufficiente sottrarre ai dati estratti dal termoflussimetro il prodotto  $U\Delta T$ .

Il fattore solare  $g$  risulta essere pari a

$$g = \frac{\sum(T_{so} * I_{out} + U_g * \Delta T + q_i) - \sum(U_g * \Delta T)}{\sum I_{out}}$$

Noti i valori

- $(T_{so} * I_{out}) = I_{en}$  ;
- $(U_g * \Delta T + q_i) = HF$ ;
- $U_g =$  trasmittanza estratta dai dati notturni
- $\Delta T = T_{ai} - T_{ae}$
- $I_{out}$

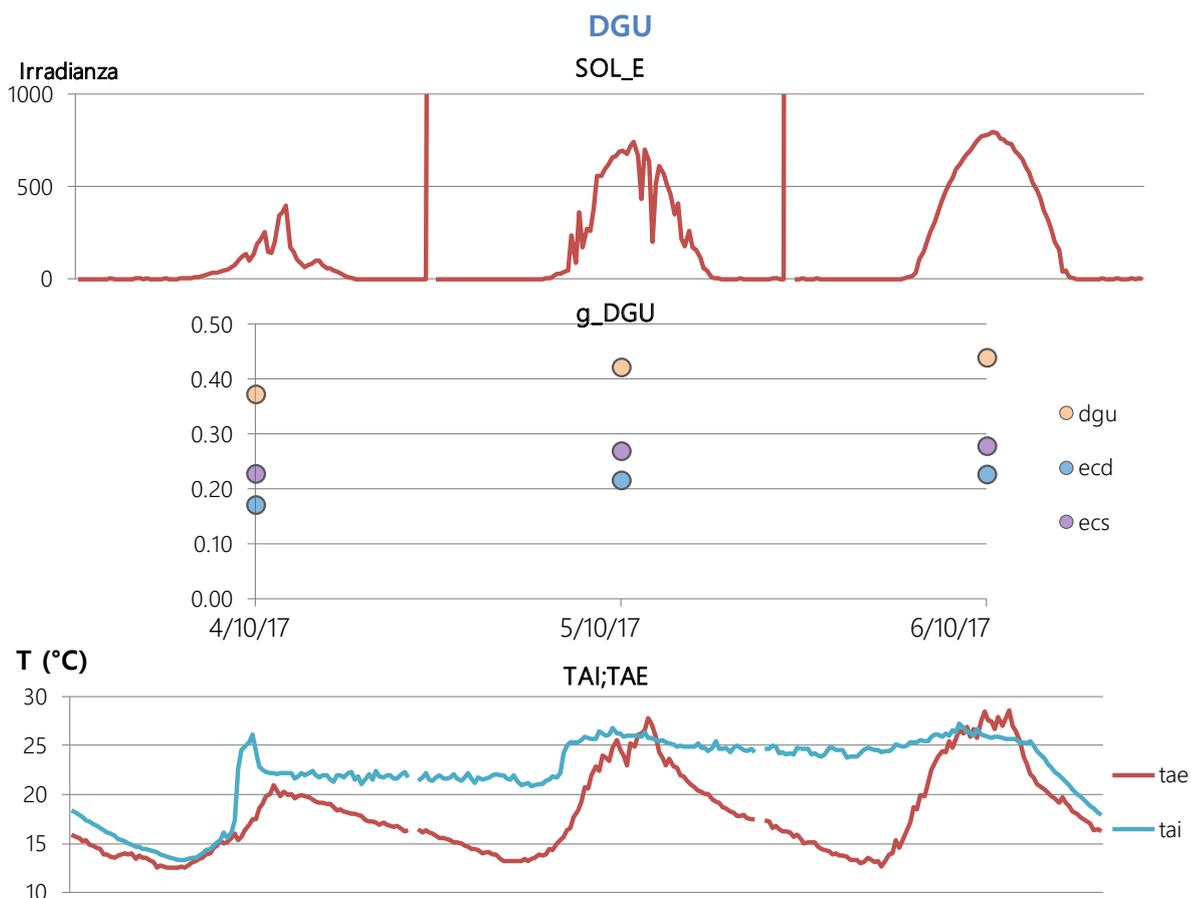
è possibile estrarre i corrispondenti  $g$  giornalieri.

Tuttavia anche nel caso dell'estrazione dei fattori solari dai dati misurati si può notare una grande incertezza dovuta ai seguenti fattori:

- Incertezza dei sensori di misura, in particolare delle termocoppie (errore dello strumento 0,3°C)
- Incertezza dei valori di trasmittanza calcolati dovuti alla variabilità registrata.
- Margine di errore dovuto al procedimento di calcolo di  $g$ , che considera dati provenienti da sensori diversi. Infatti dove si tenta di estrarre  $q_i$  in periodo notturno (dove il valore dovrebbe

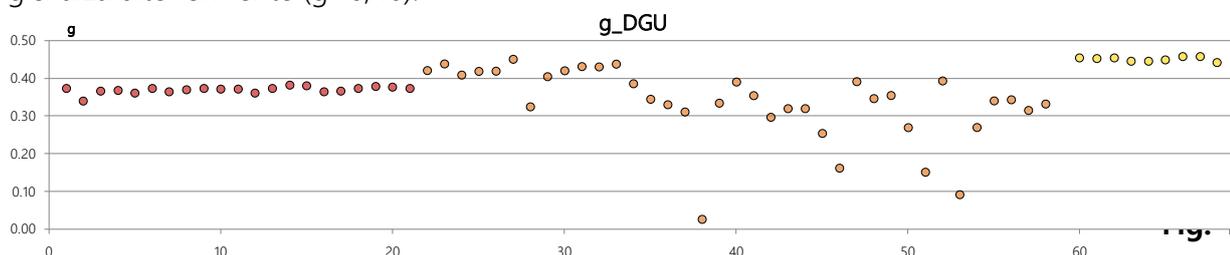
<sup>77</sup> Vedere pag 20

essere pari a 0, poiché non vi è irraggiamento) i valori hanno un margine di errore da 0 di  $\pm 5$   $W/m^2K$ .

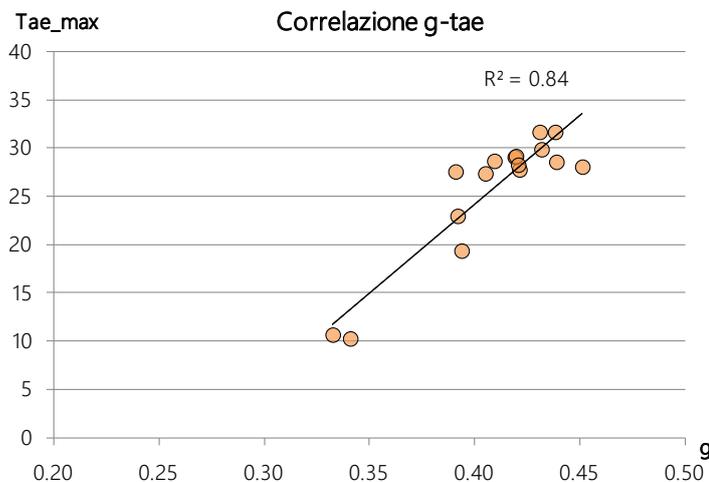


Nel caso del vetro chiaro doppio più del 90% dei valori oscilla tra  $g=0,30$  e  $g=0,46$ . Tale valore risulta influenzato dall'intensità di radiazione incidente e dalla differenza tra temperatura interna ed esterna. Nei casi di giornate nuvolose il valore risulta di norma non confrontabile o inferiore. Occorre eliminare gli outlier dovuti all'influenza climatica.

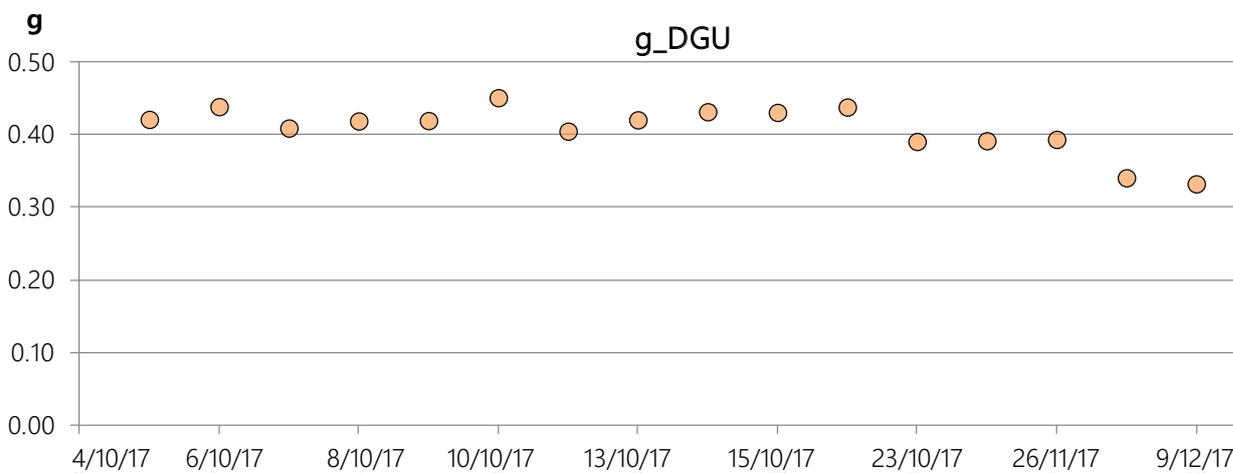
Osservando con più attenzione i dati in **Fig. 1** notiamo come ancora una volta le temperature interna ed esterna incidano su valori estratti, influenzando le temperature superficiali. Nel primo periodo di settembre (punti rossi), quando l'ambiente non condizionato ha superato i  $30^\circ$  interni, il valore di  $g$  risulta tra 0,36 e 0,38. Dal momento in cui l'ambiente viene condizionato tale valore sale posizionandosi tra 0,41 e 0,43. Nel periodo finale in cui di nuovo il mancato funzionamento del raffrescamento ha causato un abbassarsi della temperatura interna fino a  $10^\circ$ , il valore di  $g$  si alza ulteriormente raggiungendo lo 0,46. Quando la temperatura esterna è minore della temperatura interna alla cella il valore di  $g$  risulta più basso ( $g=0,39$ ). Quando la temperatura esterna è maggiore di quella interna invece il valore del fattore solare si alza ( $g=0,42$ ). Se le temperature sono simili (come nel caso delle misure ottenute in free running a dicembre) il valore di  $g$  si alza ulteriormente ( $g=0,46$ ).



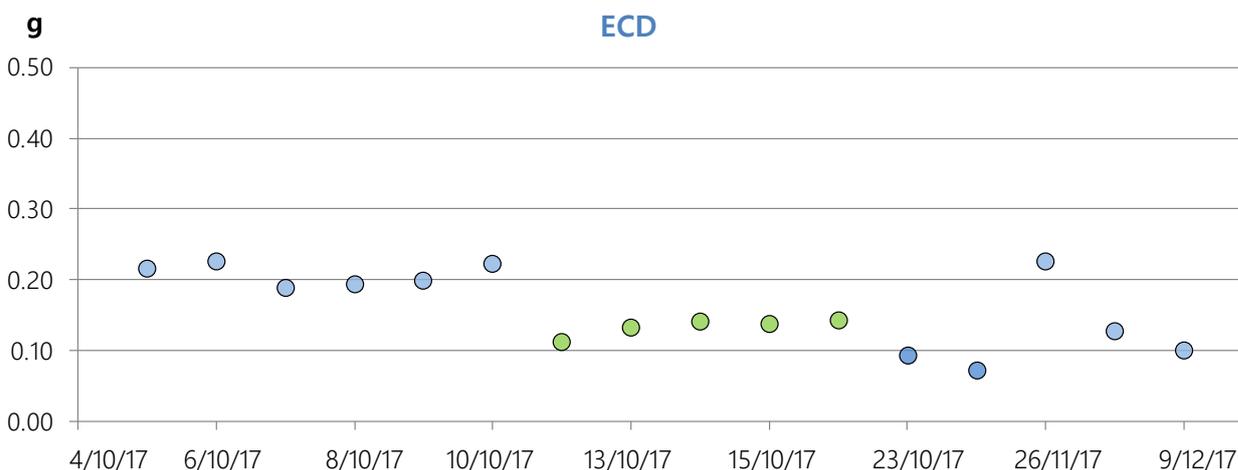
Correlando i fattori solari alle temperature esterne è possibile notare come esista una abbastanza alta correlazione tra i due dati. Dunque la variazione di g dipende dalla variazione di temperatura esterna e l'incertezza maggiore è perciò dovuta alla quota misurata dal termoflus-simetro o dalle termocoppie.



Si decide di considerare i dati estratti in periodo condizionato e in giornate totalmente serene. È possibile estrarre i risultati mostrati in **Tab 1**. Il periodo considerato intercetta giorni con temperature estive e giorni con temperature invernali. È interessante osservare come nel primo periodo (fino a metà Ottobre) g risulti stabile tra 0,41 e 0,45, stabilizzandosi successivamente a 0,39 e, con l'ulteriore abbassamento di temperatura di Dicembre, assumendo valori vicini a 0,33.

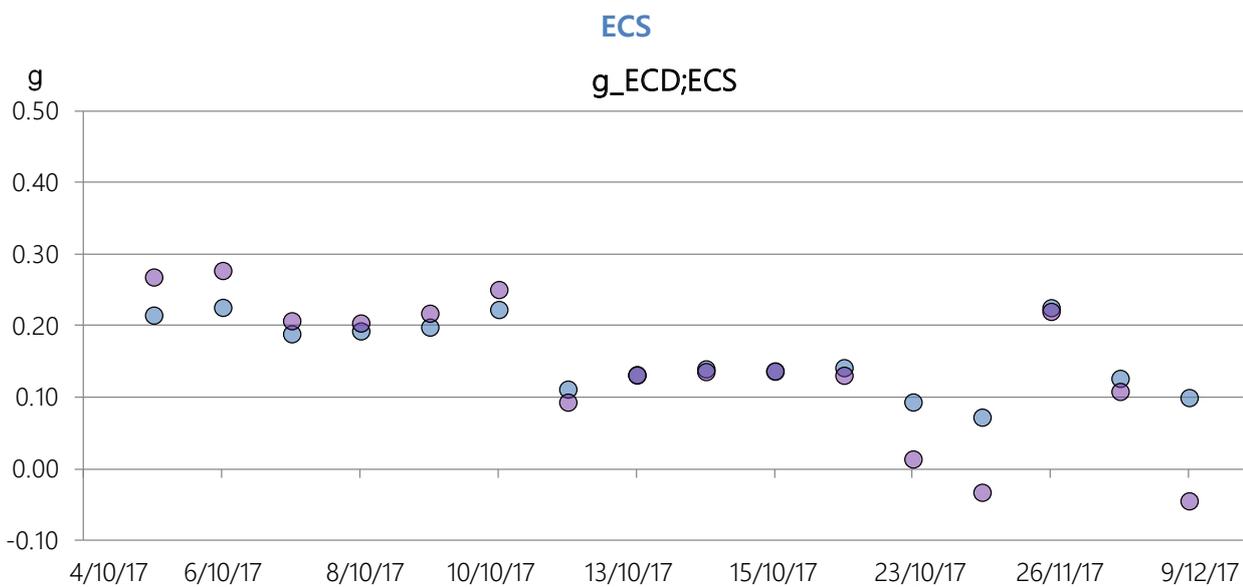


È dunque ragionevole presupporre che il valore di g si trovi tra 0,33 (periodo invernale) e 0,45 (periodo estivo).  $g_{med} = 0.375 \pm 0.055$



Si riportano i valori di g estratti dai dati selezionati secondo i criteri precedenti (giornate serene con ambiente condizionato) e suddivisi per stato di colorazione del vetro. Anche in questo caso è possibile notare come la temperatura esterna influisca sui valori di g, in particolare come nelle misure invernali con vetro totalmente trasparente abbatta il valore del fattore solare ai valori registrati per il vetro totalmente colorato. Tali valori non sono considerabili affidabili.

Nel caso dell'ECD inseriamo i valori di g nel caso di massima e minima trasparenza misurati con temperature calde. Con vetro totalmente chiaro il valore di g si trova tra 0,19 e 0,23; con vetro totalmente colorato il valore si trova tra 0,7 e 0,9.

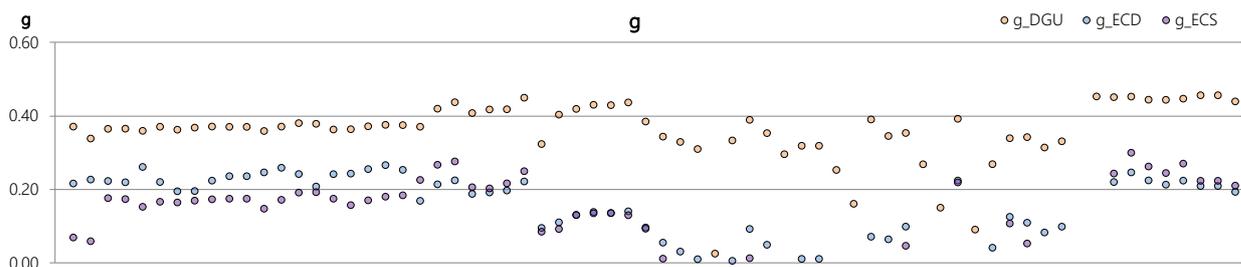


Nel caso dell'ECS è possibile notare come nella maggior parte dei casi risulta molto vicino a quello del vetro doppio, elemento che identifica come la lastra elettrocromica sia l'elemento che influisce maggiormente sul valore finale. La presenza di una seconda lastra in vetro chiaro e rivestimento basso-emissivo ha effetti decisamente ridotti sul calcolo finale del fattore solare.

VALORI DI g GIORNATE SERENE			
Data	g_DGU	I <sub>max</sub>	Tae_max
05/10/2017	0.42	744.3	27.8
06/10/2017	0.44	799.4	28.6
07/10/2017	0.41	840.7	28.7
08/10/2017	0.42	798.2	29.1
09/10/2017	0.42	780.6	29.2
10/10/2017	0.45	744.9	28.1
12/10/2017	0.41	708.3	27.4
13/10/2017	0.42	706.5	28.3
14/10/2017	0.43	721.0	29.9
15/10/2017	0.43	738.1	31.7
16/10/2017	0.44	753.2	31.7
23/10/2017	0.39	820.6	27.6
30/10/2017	0.39	725.2	23.0
26/11/2017	0.39	892.5	19.4
03/12/2017	0.34	877.1	10.3
09/12/2017	0.33	920.0	10.7

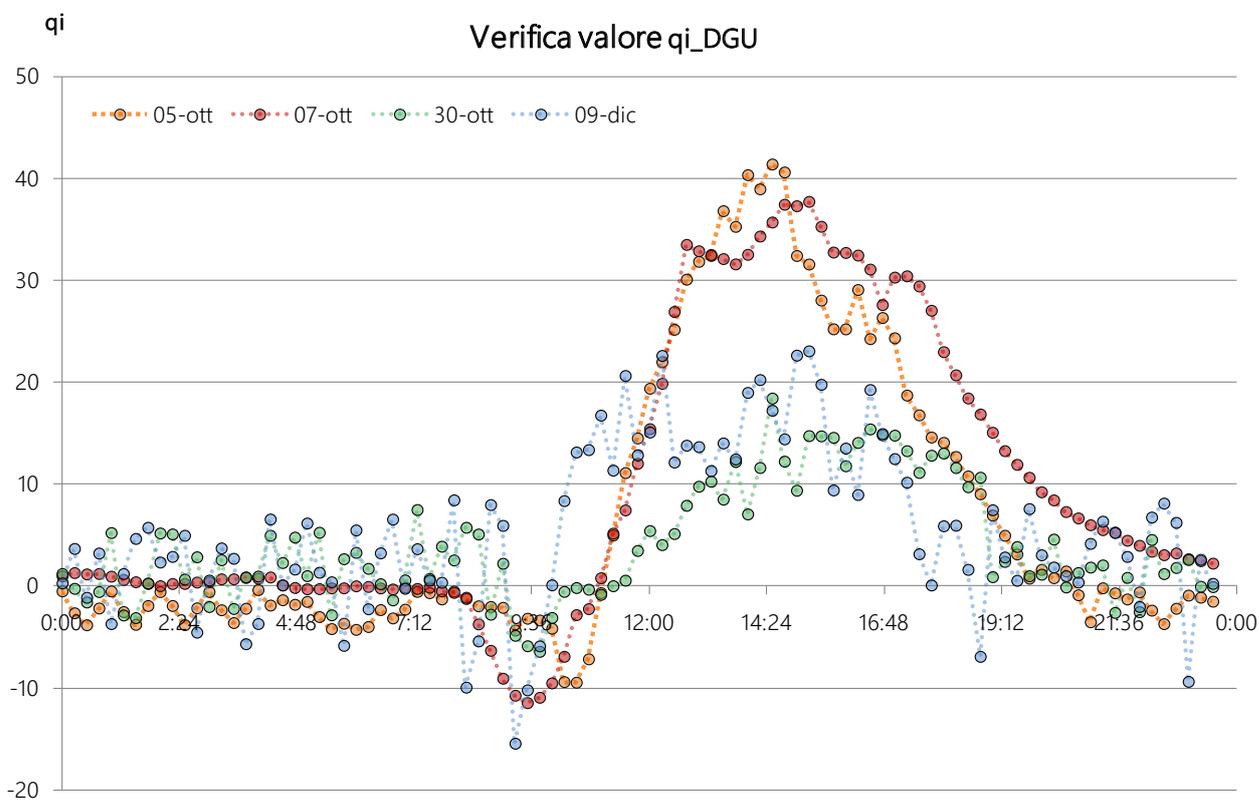
VALORI DI g GIORNATE SERENE			
Data	stato ec	g_ECD	g_ECS
05/10/2017		0.22	0.27
06/10/2017		0.23	0.28
07/10/2017	10	0.19	0.21
08/10/2017		0.19	0.20
09/10/2017		0.20	0.22
10/10/2017		0.22	0.25
12/10/2017	4	0.11	0.09
13/10/2017		0.13	0.13
14/10/2017		0.14	0.14
15/10/2017		0.14	0.14
16/10/2017		0.14	0.13
23/10/2017	1	0.09	0.01
30/10/2017		0.07	-0.03
26/11/2017		0.23	0.22
03/12/2017	10	0.13	0.11
09/12/2017		0.10	-0.04

Nel grafico sotto riportato si può notare come si registrino frequenti valori evidentemente errati, dovuti alle fonti di errore presentate precedentemente, soprattutto nel periodo invernale.



### 2.2.3 VERIFICA DEI VALORI DI TRASMITTANZA

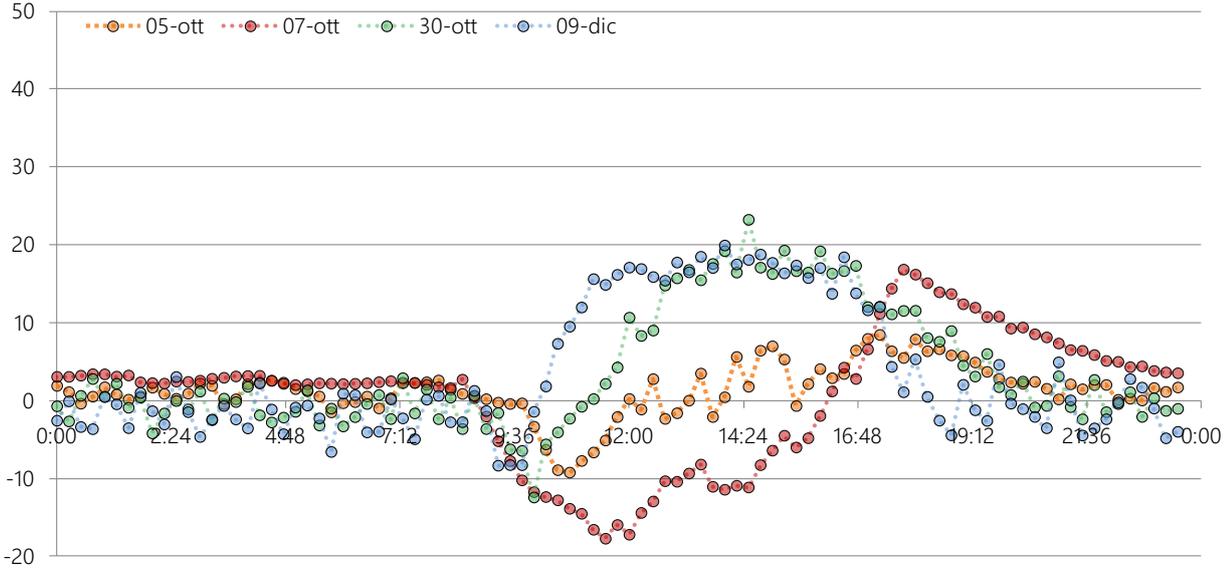
Con il procedimento utilizzato per l'estrazione di  $g$  illustrato precedentemente è possibile controllare i valori di  $U$  ricavati: infatti più il valore di  $U$  si avvicina a quello reale più i valori di  $q_i$  notturni (parte di radiazione assorbita e ri-emessa internamente) stanno nell'intorno di  $y=0$ .



Si verifica che il valore di trasmittanza identificato nei sistemi con camera porta a uno scarto notturno da  $y=0$  molto contenuto per i giorni con temperature calde-medie, ove tale scarto rimane entro i  $4^{\circ}\text{C}$ , aumentando invece nei giorni con maggiore delta di temperatura tra interno ed esterno (entro  $9^{\circ}\text{C}$ ). Nel caso della lastra singola elettrocromica invece troviamo una estrema irregolarità nei dati estratti. La variabilità di  $q_i$ , crescente con il decrescere delle temperature esterne, è la maggiore fonte di errore che porta alla distorsione dei dati sopra presentata. Infatti gli outlier di  $g$  si presentano con le condizioni climatiche che portano alla variabilità di  $q_i$  (periodo invernale).

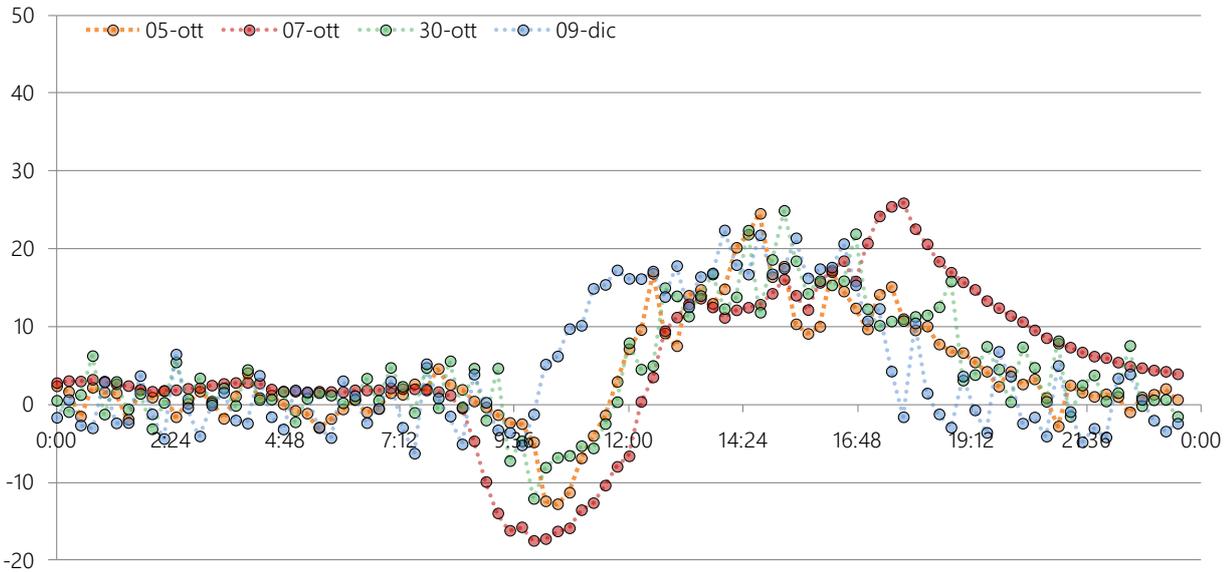
qi

Verifica valore qi\_TCD



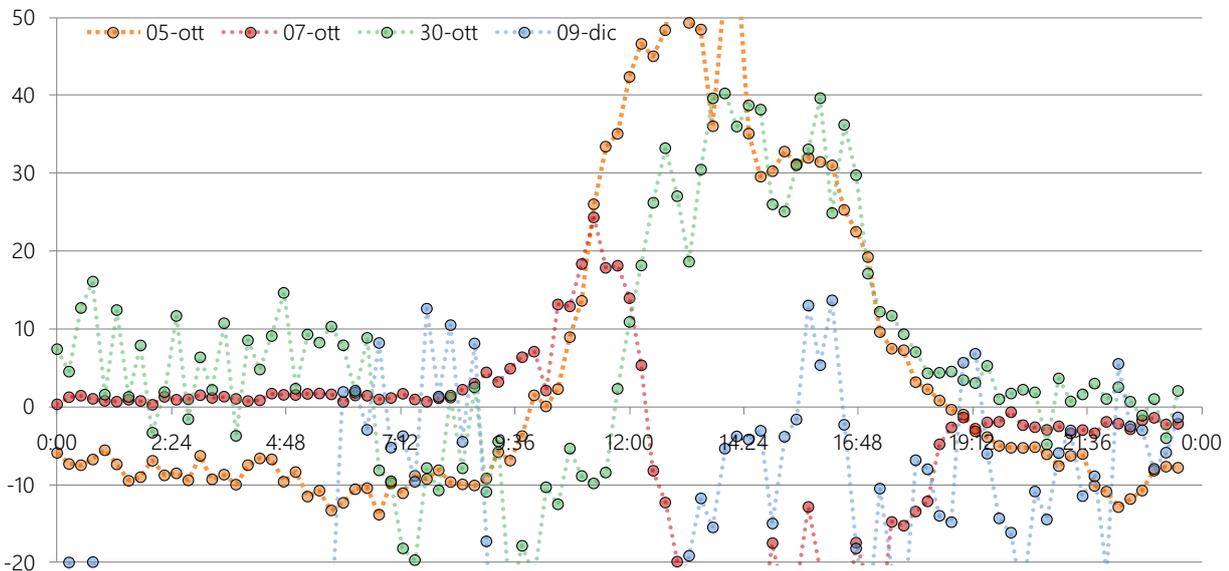
qi

Verifica valore qi\_ECD



qi

Verifica valore qi\_ECS



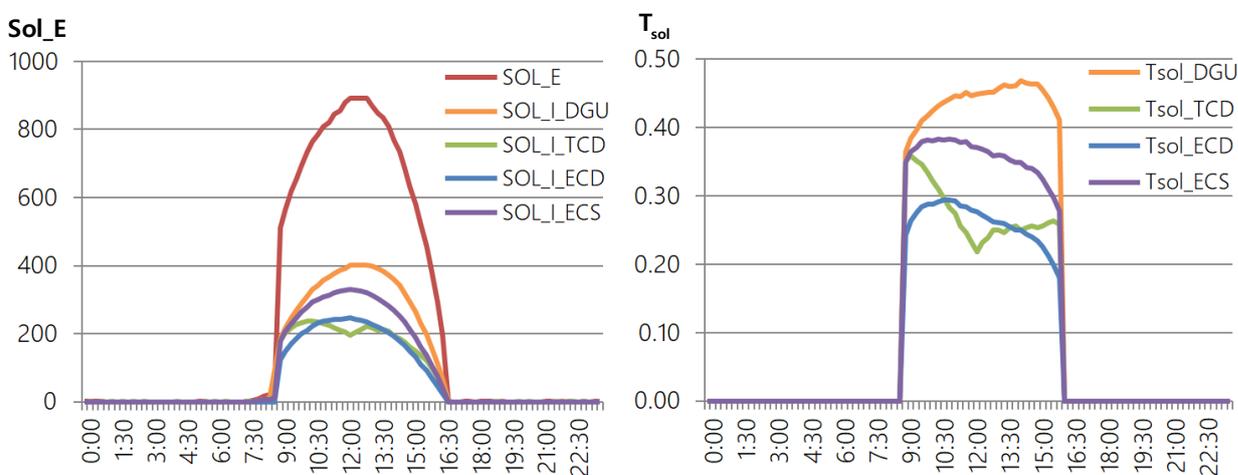
## 2.2.4 CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Il processo di caratterizzazione termica si basa sui dati termici di Irradianza, Flusso Termico e Temperature Superficiali rilevate dai sensori.

### Irradianze

I grafici dell'irradianza dei tre vetri mostrano una sensibile diminuzione della energia entrante rispetto a quella incidente esternamente. Tale riduzione è quantificabile grazie al parametro  $T_{sol}$  (trasmissione solare), calcolata con l'equazione  $T_{sol} = I_{glass}/I_{out}$ . Per analizzare il comportamento dei diversi sistemi vetrati è opportuno operare una distinzione tra le macro-condizioni atmosferiche esterne, che incidono in modo sensibile sulle corrispondenti prestazioni.

#### Giornata totalmente serena \_ 26 Novembre 2017 \_ EC massima trasparenza



La giornata analizzata è totalmente serena, con cielo limpido e valori di Irradianza fino a 900 W/m<sup>2</sup>. Il vetro elettrocromico è settato al massimo della trasparenza. Possiamo notare come gli andamenti di DGU, ECD e ECS ricalchino precisamente l'andamento della radiazione incidente esternamente, con una sensibile diminuzione dei valori di irradianza.

Il TCD, unico vetro dinamico passivo, è l'unico grafico che non ricalca i precedenti: con l'aumentare della temperatura e l'innescarsi del processo termocromico il suo andamento si distacca dagli altri di un delta dipendente dalla temperatura dell'ambiente e dell'Irradianza incidente.

Il sistema che permette maggiormente il passaggio della radiazione solare è il DGU: escludendo le primissime e le finali ore della giornata né il vetro termocromico né l'elettrocromico allo stato chiaro raggiungono i valori del DGU mantenendo uno scarto percentuale del 18 e 40%.

La lastra elettrocromica singola è il secondo sistema per passaggio di radiazione, seguito da elettrocromico doppio e termocromico, che benché seguano andamenti dissimili e comportamento diverso a seconda del momento considerato mantengono una trasmissione media calcolata sulle ore di luce naturale simile.

26-nov	DGU	TCD	ECD	ECS
$T_{sol-med}$	0,45	0,27	0,27	0,37

## Giornate variabili e coperte \_ 24-25 Novembre 2017 \_ EC massima trasparenza

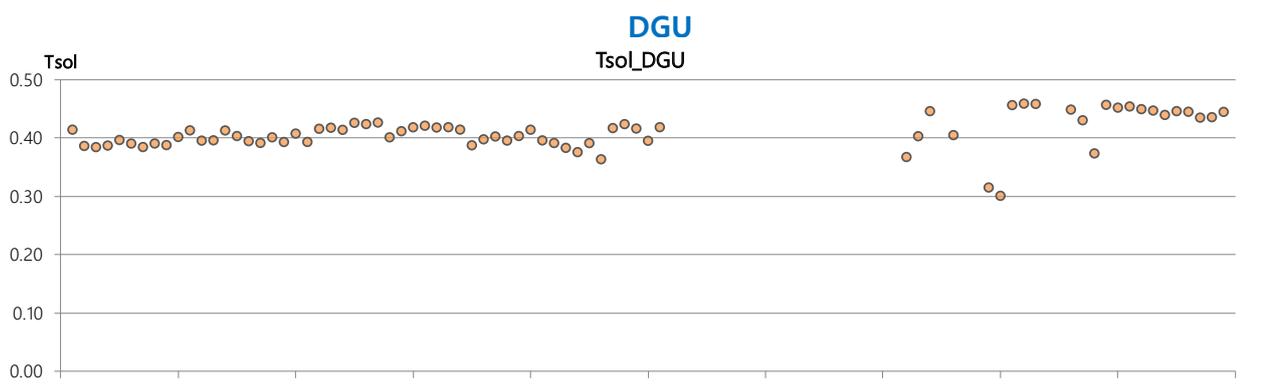


	24 Novembre	25 Novembre
Tsol_m_DGU	0,37	0,40
Tsol_m_TCD	0,30	0,31
Tsol_m_ECD	0,10	0,20
Tsol_m_ECS	0,34	0,35

Nelle giornate dov'è parzialmente o totalmente assente la radiazione solare diretta gli andamenti delle irradianze interne ricalcano quasi precisamente l'andamento dell'irradianza esterna incidente nel caso di tutti e quattro i sistemi vetrati. Infatti l'assenza della radiazione diretta impedisce il processo di colorazione del vetro termocromico, che si comporta dunque quasi alla stregua degli altri sistemi vetrati. Com'è possibile notare dai grafici con la diminuzione dell'irradianza incidente diminuisce visibilmente anche il delta di irradianza trasmessa, e dunque anche di  $T_{sol}$  dei quattro vetri. I grafici delle irradianze entranti assumono valori quasi identici, dunque la quantità di energia trasmessa attraverso i componenti trasparenti sarà all'incirca la stessa indipendentemente dal sistema preso in considerazione. Tale fattore può assumere un valore positivo o negativo a seconda delle condizioni presenti al contorno: in una giornata nuvolosa un simile valore di irradianza è indicatore anche di simili valori di trasmissione visibile e dunque di illuminamento interno.

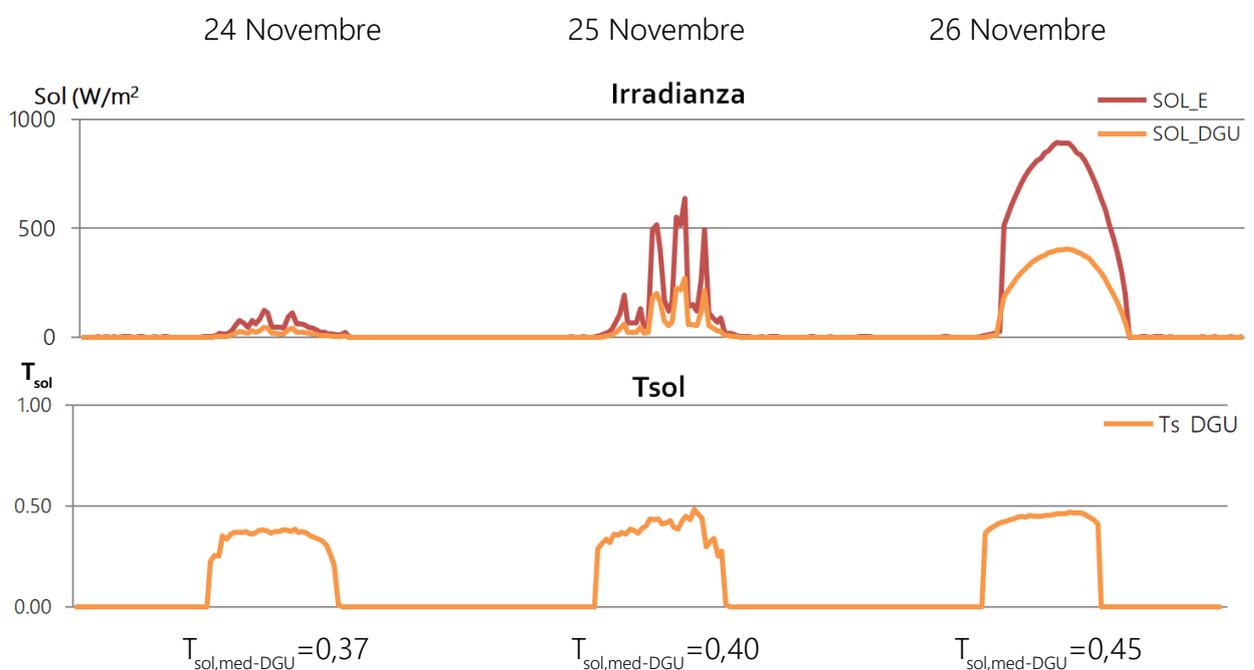
## TRASMISSIONE SOLARE

Esaminiamo i valori di trasmissione solare estrapolati dai dati raccolti:

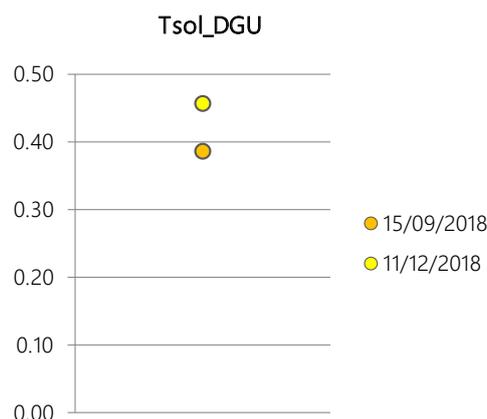


Il valore  $T_{sol,med}$  del vetro chiaro doppio risulta avere un valore compreso tra 0,39 e 0,46, con picchi fino a 0,48. Normalmente i vetri chiari doppi risultano rivestire valori di  $T_{sol}$  decisamente superiori a tale valore identificato sperimentalmente. Occorre considerare infatti che le vetrate sono inserite in un ambiente spazialmente ridotto e con dimensioni non realistiche rispetto alle stanze di un edificio standard. La dimensione della cella probabilmente influenza la radiazione solare riflessa e diffusa che raggiunge il piranometro, limitando il valore  $T_{sol}$  estrapolato. Inoltre vi è un effetto di riduzione di  $T_{sol}$  dovuto ai fenomeni di albedo e riflessione causati dalla colorazione chiara della pavimentazione. Il piranometro esterno infatti risulta decentrato rispetto alla cella e al telo nero utilizzato per ridurre i fenomeni sopra descritti, dunque è probabile che risenta di un influenza non quantificabile data dalle condizioni esaminate.

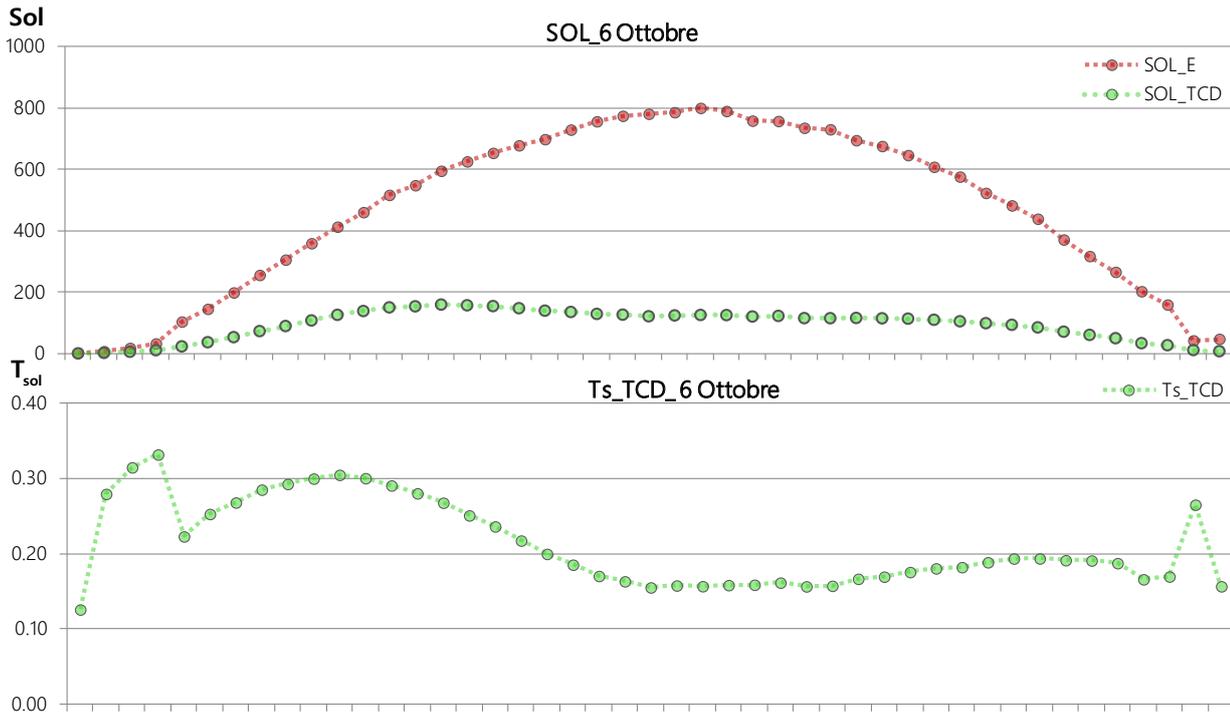
Il DGU risulta il sistema che permette maggiormente il passaggio di radiazione solare. Occorre notare che tale valore di trasmissione solare non è costante, ma varia al variare dell'irradianza esterna raggiunta. Maggiori sono i valori di irradianza esterna raggiunta, maggiore è il valore del  $T_{sol,DGU}$  misurato.



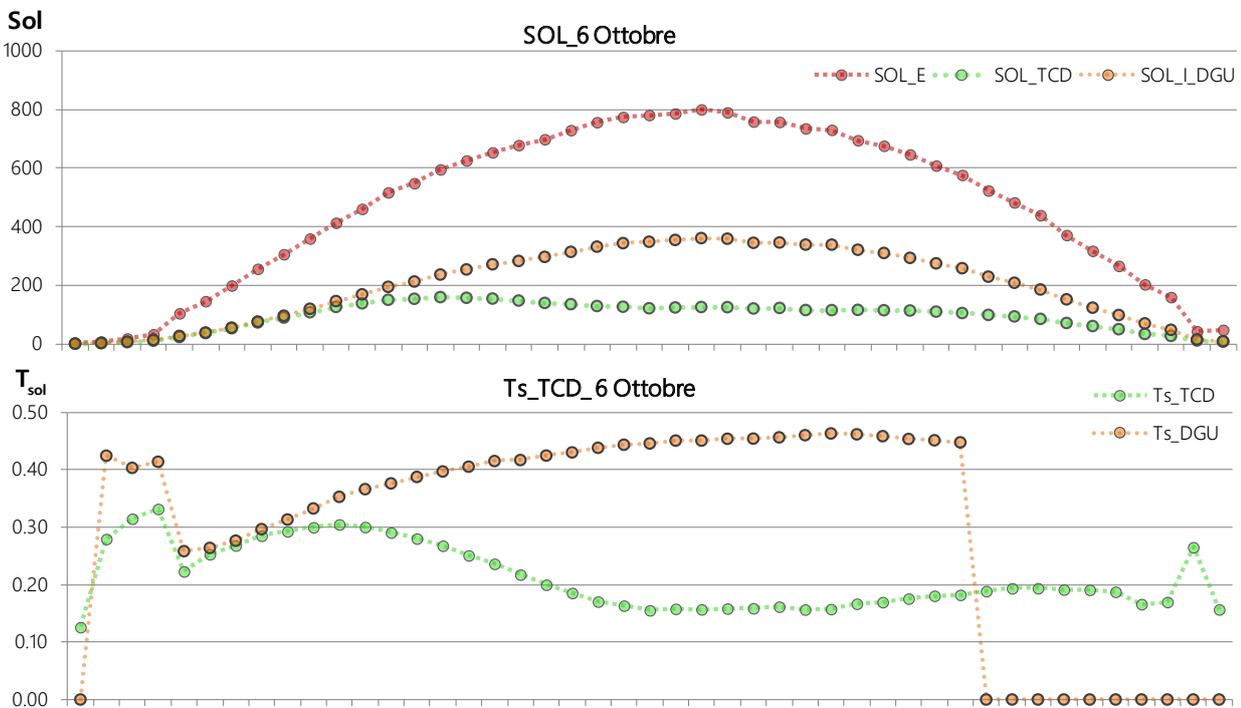
È possibile leggere tale fenomeno confrontando le Trasmissioni solari di giornate con condizioni meteorologiche differenti, quali la diversa presenza di nuvole e l'Irradianza massima raggiunta. Nelle giornate di Dicembre, dove quest'ultimo parametro ha raggiunto livelli molto alti possiamo vedere che i livelli di  $T_{sol}$  Dicembrini raggiungono come media giornaliera lo 0,46, mentre il valore di Ottobre ha come massimo 0,40.



## TCD

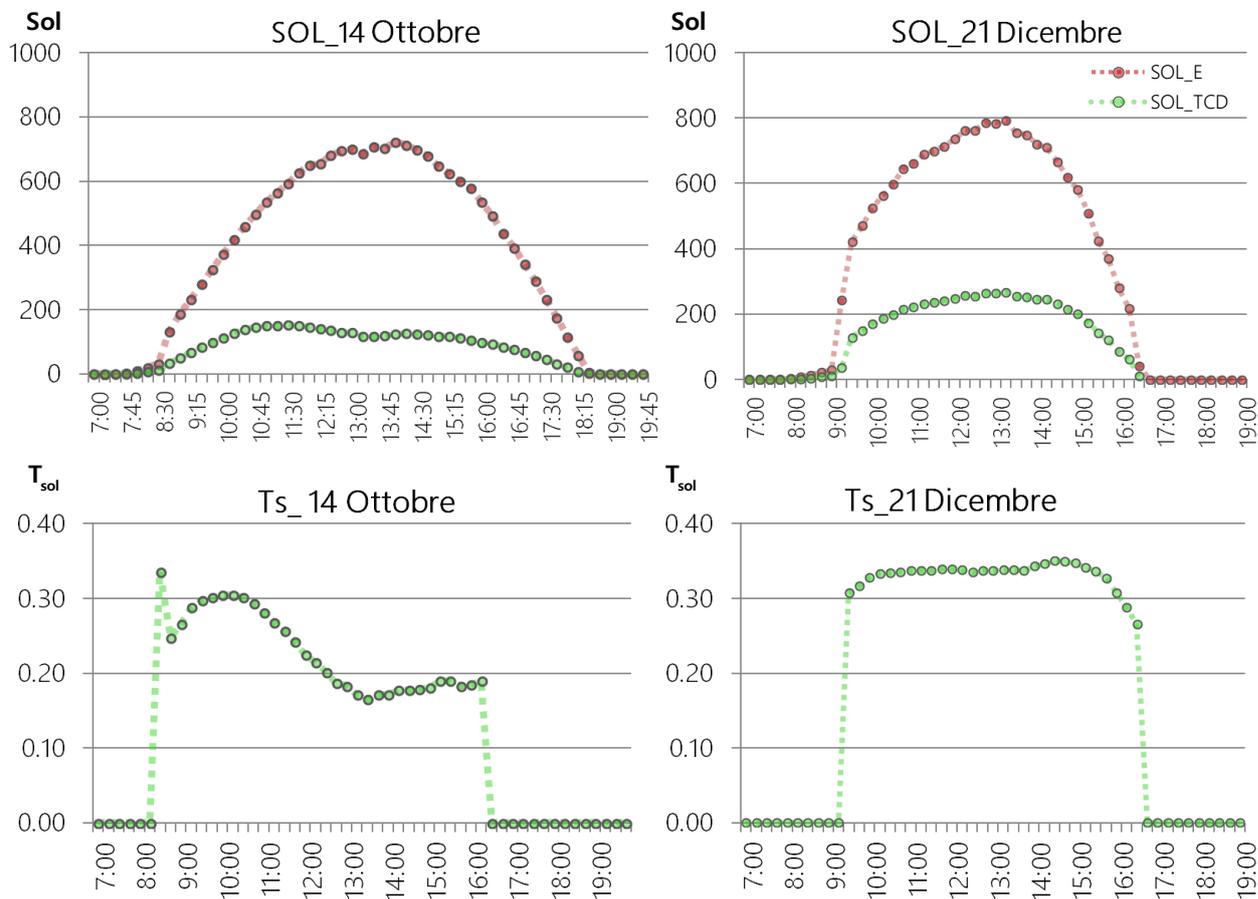


Come già è stato possibile notare nelle pagine precedenti con l'aumentare della temperatura e l'innescarsi del processo termocromico il vetro riduce notevolmente il valore di trasmissione solare (da  $T_{sol,max}=0,35$  a  $T_{sol,min}=0,17$  calcolato su tutti i giorni di misure). I valori di trasmissione sono simili a quelli del DGU finché l'irradianza esterna non raggiunge valori tra i 300 e i 400 W/m<sup>2</sup>, con ambiente condizionato tra i 20° e i 25°C.

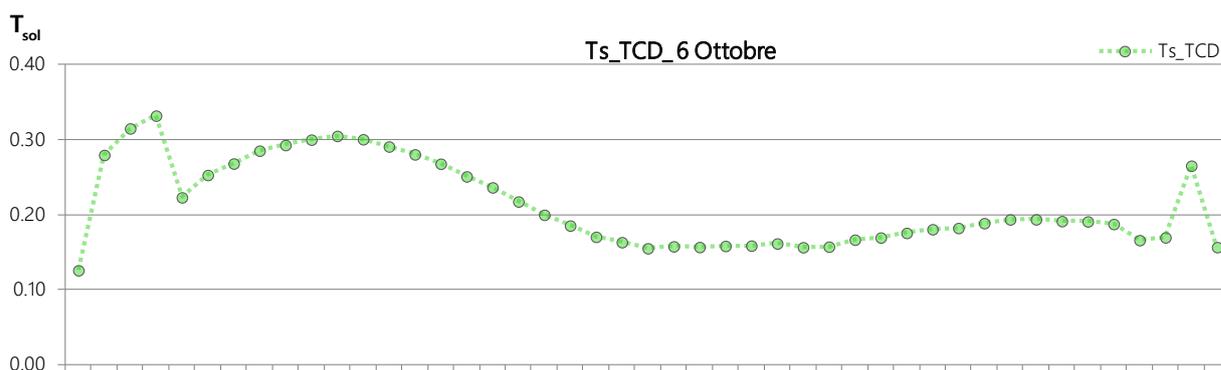


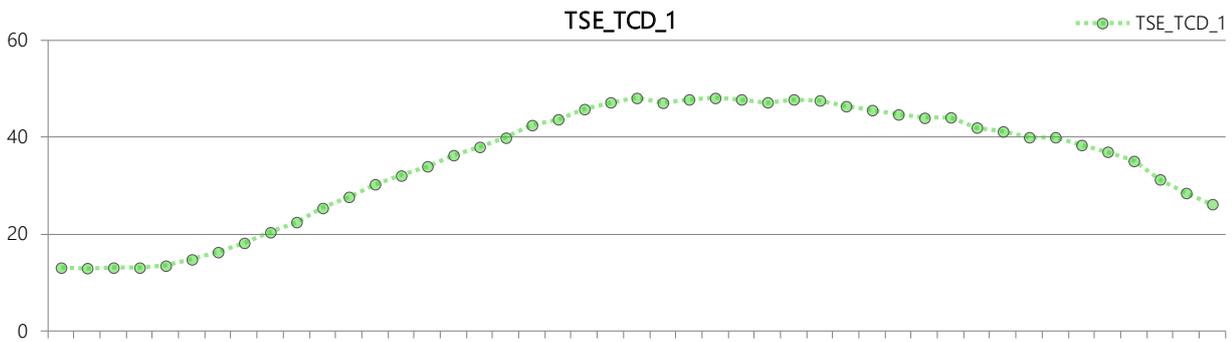
Il malfunzionamento della cella frigorifera ha permesso alcune interessanti valutazioni del comportamento del vetro termocromico in ambiente non condizionato. Nel periodo estivo (primi giorni di settembre) la temperatura interna alla cella ha superato frequentemente i 40°, ma tale temperatura non ha influito sull'Irradianza critica che innescava il cambiamento di colorazione

del vetro (sempre intorno ai 300-340 W/m<sup>2</sup>). Al contrario il malfunzionamento nel periodo invernale che ha portato la cella ad avere temperature interne diurne tra i 5 e i 15°C ha influito con forza sul funzionamento del vetro. Infatti le trasmissioni solari minime raggiunte dal termocromico nella parte centrale della giornata non sono mai scese sotto lo 0,28 (contro lo 0,17 con ambiente condizionato) benché l'irradianza incidente esternamente arrivasse a livelli decisamente superiori a quelli misurati nelle settimane precedenti (fino a 900 W/m<sup>2</sup>).

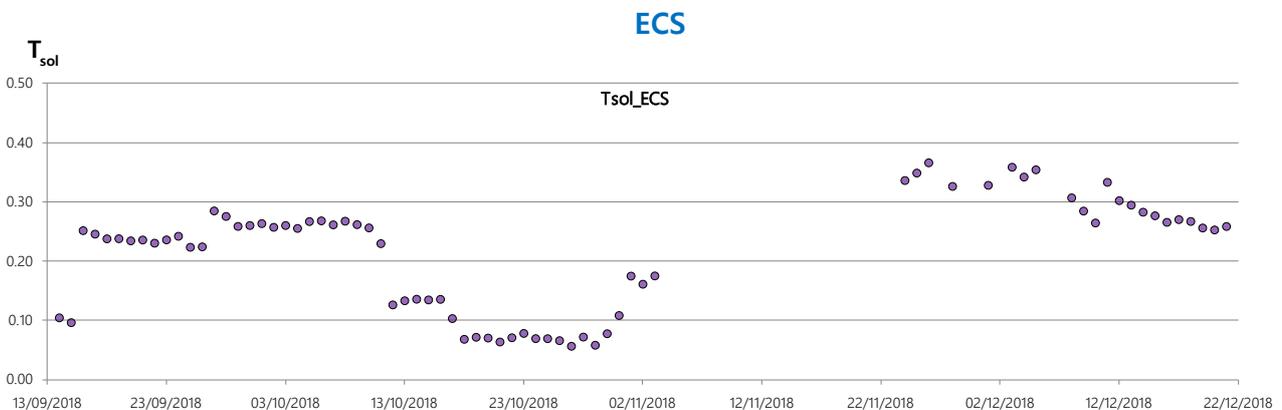
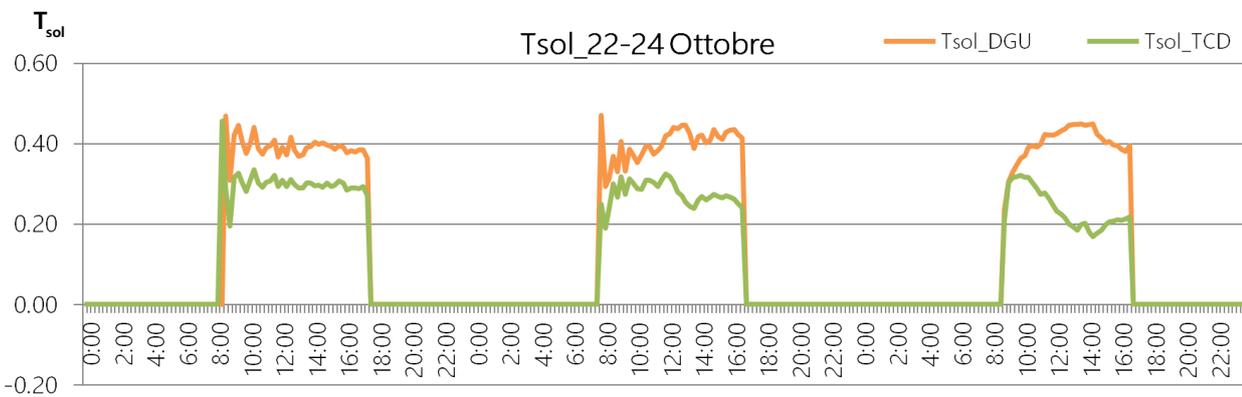
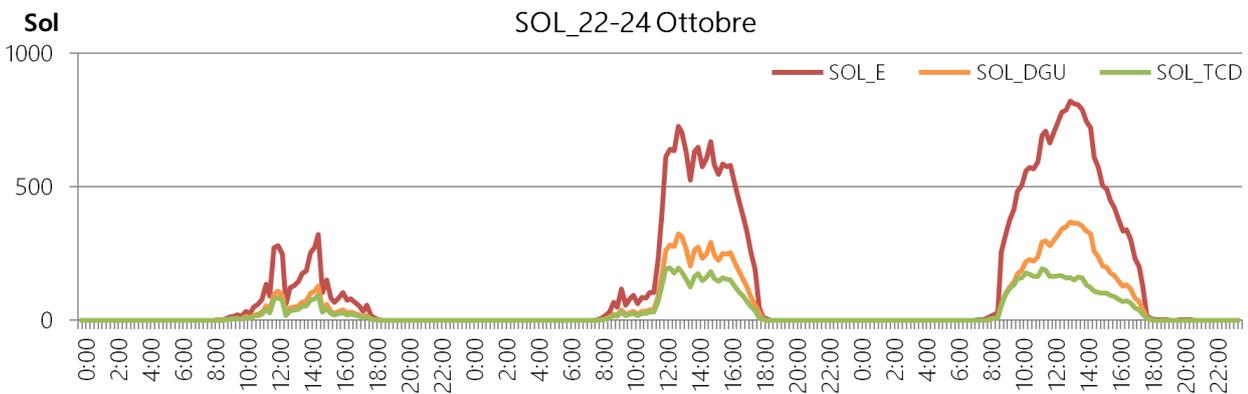


Nei momenti di picco la trasmissione ha raggiunto lo 0,35 nelle giornate serene. Questo fatto dimostra che l'influenza del flusso termico trasmesso per conduzione e convezione è decisamente maggiore rispetto a quella della quota assorbita dal vetro nello stato di trasparenza massima. La temperatura superficiale della lastra esterna termocromica infatti nel caso invernale ha raramente superato la soglia dei 25°; nel periodo estivo con la cella non condizionata essa ha invece raggiunto e superato i 50° nella parte centrale della giornata; anche con cella condizionata sono stati raggiunti valori simili. Dai dati raccolti è possibile notare come la reazione termocromica cominci ad avvenire intorno ai 20°, ma subisca una variazione considerevole solo dopo i 30°.



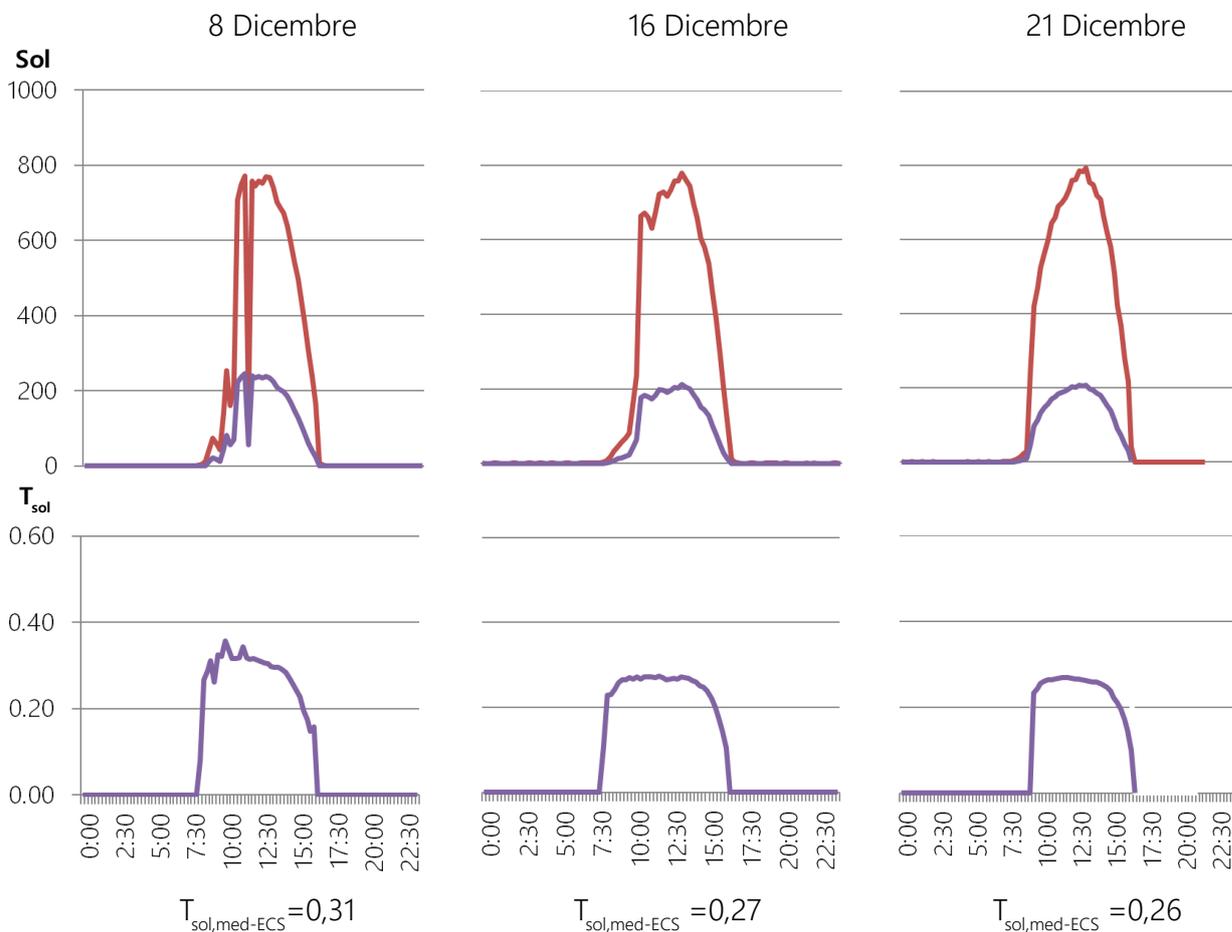


Allo stesso modo nelle giornate coperte il vetro termocromico non subisce una variazione di colore perché è assente la radiazione solare diretta che colpisce la lastra, e il suo comportamento è assimilabile a quello degli altri vetri.



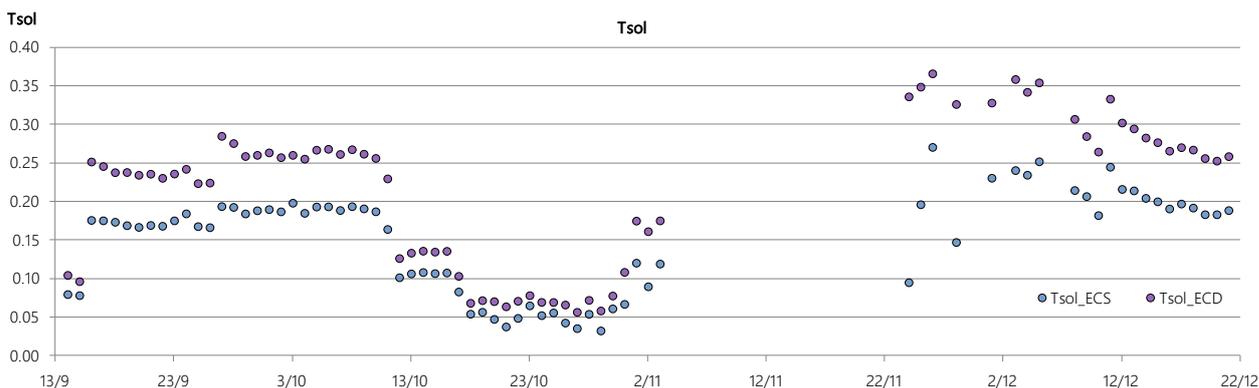
È possibile leggere il fenomeno di riduzione di  $T_{sol}$  precedentemente descritto anche sui valori di trasmissione del vetro elettrocromico, che al massimo stadio di trasparenza raggiunge in momenti puntuali picchi di  $T_{sol,max} = 0,44$ . Da catalogo il valore massimo di trasmissione solare risulta

0,52. Abbiamo una riduzione percentuale del valore di trasmissione misurato in loco del 20-25%. Inoltre è possibile registrare un altro fenomeno anormale sul vetro elettrocromico. Il prima citato valore di trasmissione allo stadio di massima trasparenza non viene mantenuto nel tempo: durante i primi mesi di misure sperimentali il vetro elettrocromico, dopo essere stato lasciato allo stadio di massima trasparenza si presentava a distanza di 3/4 giorni in uno stadio di leggera colorazione. Il fenomeno risulta evidente esaminando le trasmissioni solari di giornate con andamento di irradianza esterna comparabili.



Dunque si è deciso di considerare come massimo stadio di trasparenza il valore di  $T_{sol}$  mantenuto nel tempo dal vetro elettrocromico, pari a 0,26. Tale valore risulta estremamente ridotto rispetto ai valori massimi raggiunti, pari a 0,40. Il fenomeno di riduzione di  $T_{sol}$  non dovrebbe presentarsi su sistemi di tale genere.

### ECD



La presenza della camera e della lastra interna in vetro chiaro con rivestimento basso-emissivo incide sulla trasmissione solare del componente trasparente abbattendo la trasmissione solare del 27-28% rispetto alla lastra singola allo stadio massimo di trasparenza. Tale percentuale si riduce con la colorazione della lastra dell'elettrocromico: man mano che il vetro assume una colorazione più intensa diminuisce il delta tra le trasmissioni solari dei due sistemi .

### EC massima trasparenza

#### Giornate totalmente serena, variabile e coperta \_ 24-25-26 Novembre 2017

Esaminando lo stato di partenza del vetro elettrocromico, settato al massimo stadio di trasparenza, possiamo identificare alcuni fenomeni: innanzitutto si nota una leggera riduzione dei valori  $T_s$  nelle giornate coperte, associabile alla diminuzione dell'irradianza incidente. Nel caso del vetro doppio tale riduzione falsa i valori di  $T_{sol}$  ricavabili grazie al rapporto tra Irradianza entrante e incidente. Nelle giornate parzialmente nuvolose l'energia entrante è all'incirca la stessa, mentre nelle giornate serene si può leggere un discreto distacco tra i due tipi di sistema.

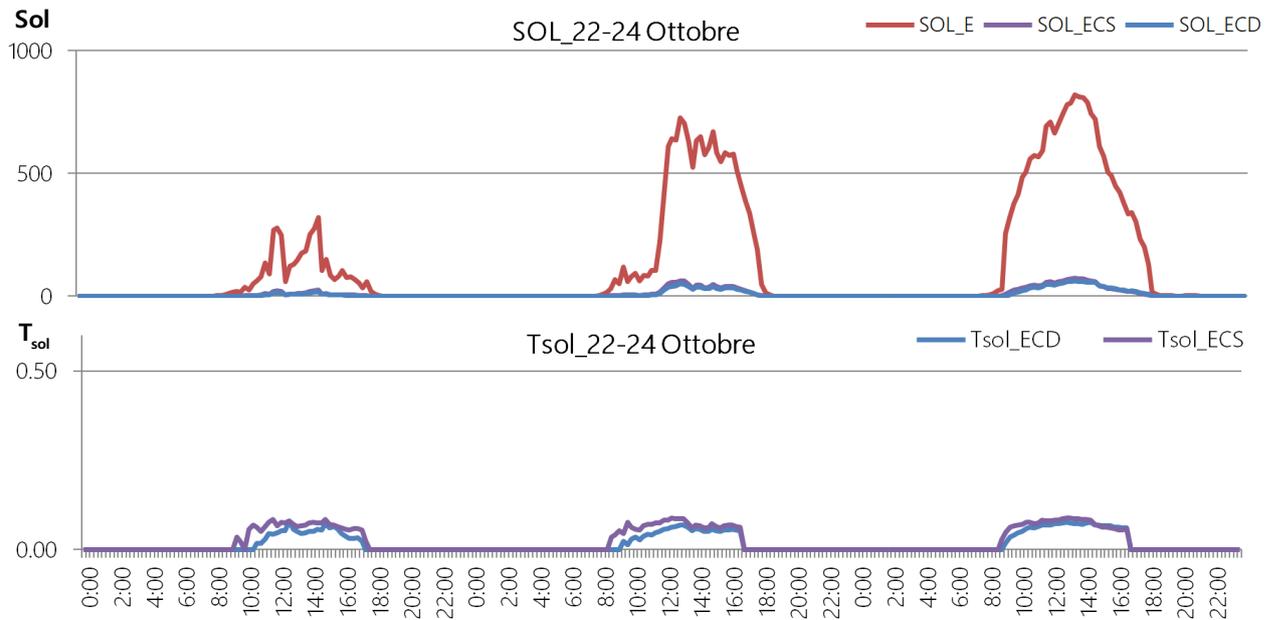


Tsol_med	DGU	TCD	ECD	ECS
24-nov	0,37	0,30	0,10	0,34
25-nov	0,40	0,31	0,20	0,35
26-nov	0,45	0,27	0,27	0,37

### EC massima colorazione

#### Giornate totalmente serena, variabile e coperta \_ 21-22-23 Ottobre 2017

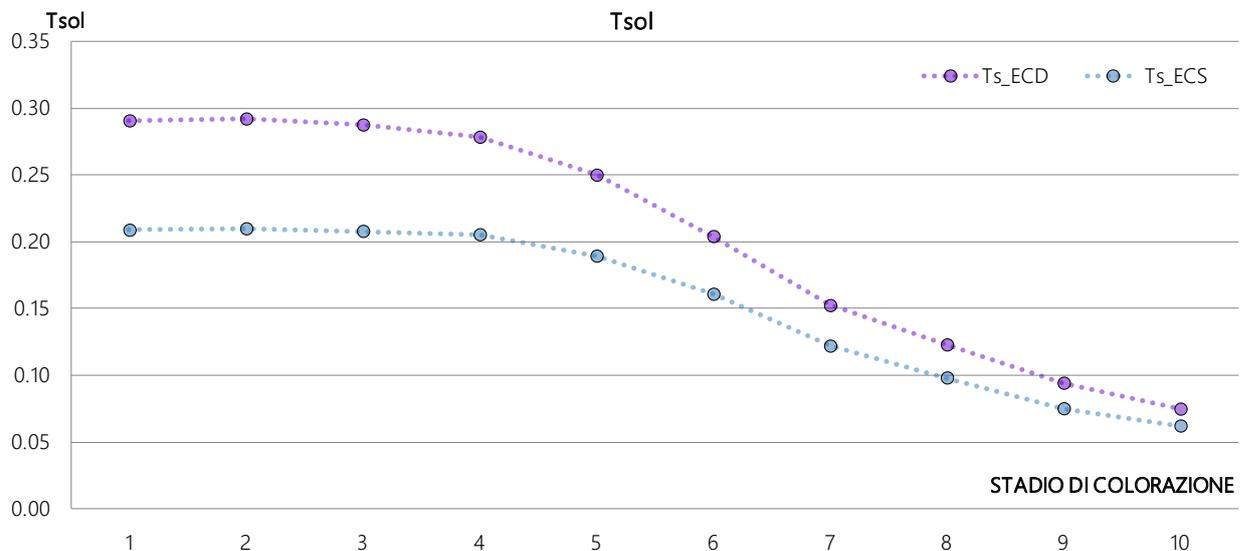
In questa sezione esaminiamo l'altro stato limite del vetro elettrocromico, ovvero il comportamento allo stadio di massima colorazione. Esaminando i valori di trasmissione possiamo notare come si ripeta il fenomeno già precedentemente identificato di leggera riduzione dei valori  $T_s$  nelle giornate coperte, associabile alla diminuzione dell'irradianza incidente.



Tsol_med	DGU	TCD	ECD	ECS
21-ott	0,40	0,30	0,04	0,06
22-ott	0,40	0,29	0,05	0,07
23-ott	0,41	0,24	0,07	0,08

Notiamo inoltre che i valori di trasmissione solare di ECD ed ECS si distaccano di una quantità minima rispetto al precedente stadio esaminato: mentre nel caso precedente vi era un distacco di 27-28 punti percentuali in questo caso il distacco si riduce a una moda del 20%; esaminando il delta tra i valori di  $T_s$  allo stadio di massima trasparenza esso risulta essere tra 0,7 e 0,9. Allo stadio di massima colorazione esso risulta invece tra 0,1 e 0,3.

Come si può notare nel seguente grafico il delta  $T_s$  diminuisce secondo una relazione di proporzionalità inversa all'intensificarsi della colorazione.

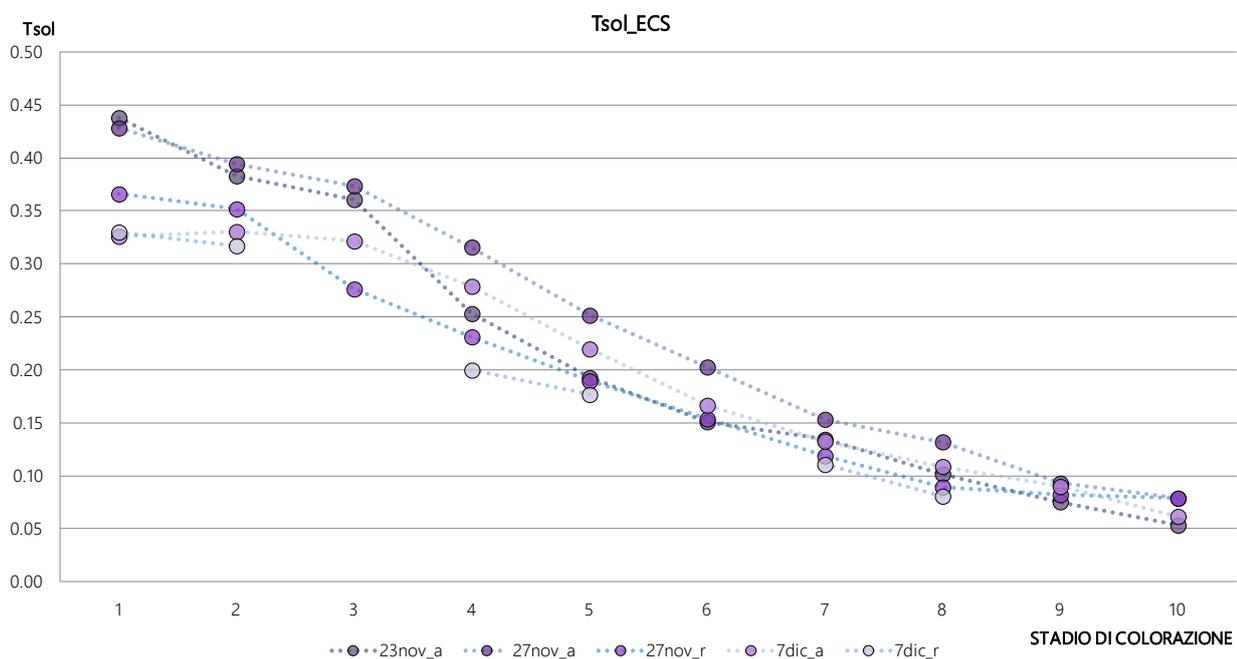
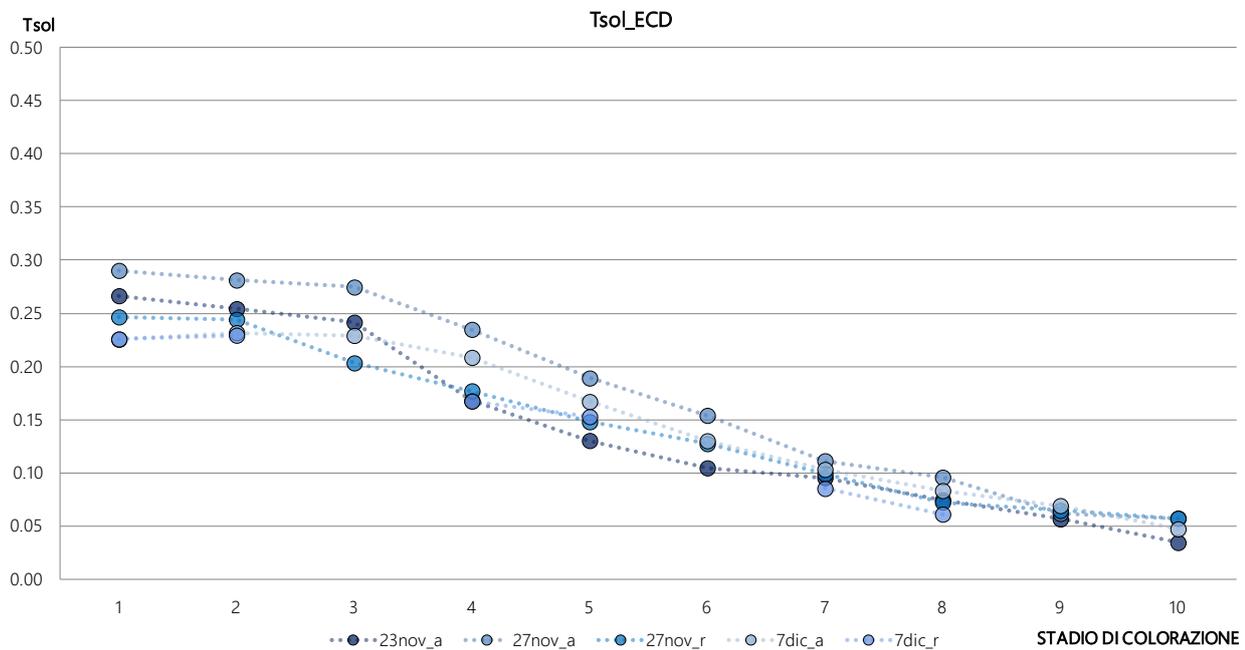


Con l'oscurarsi del vetro la presenza della camera diventa man mano sempre meno influente sul passaggio di radiazione all'interno dell'ambiente.

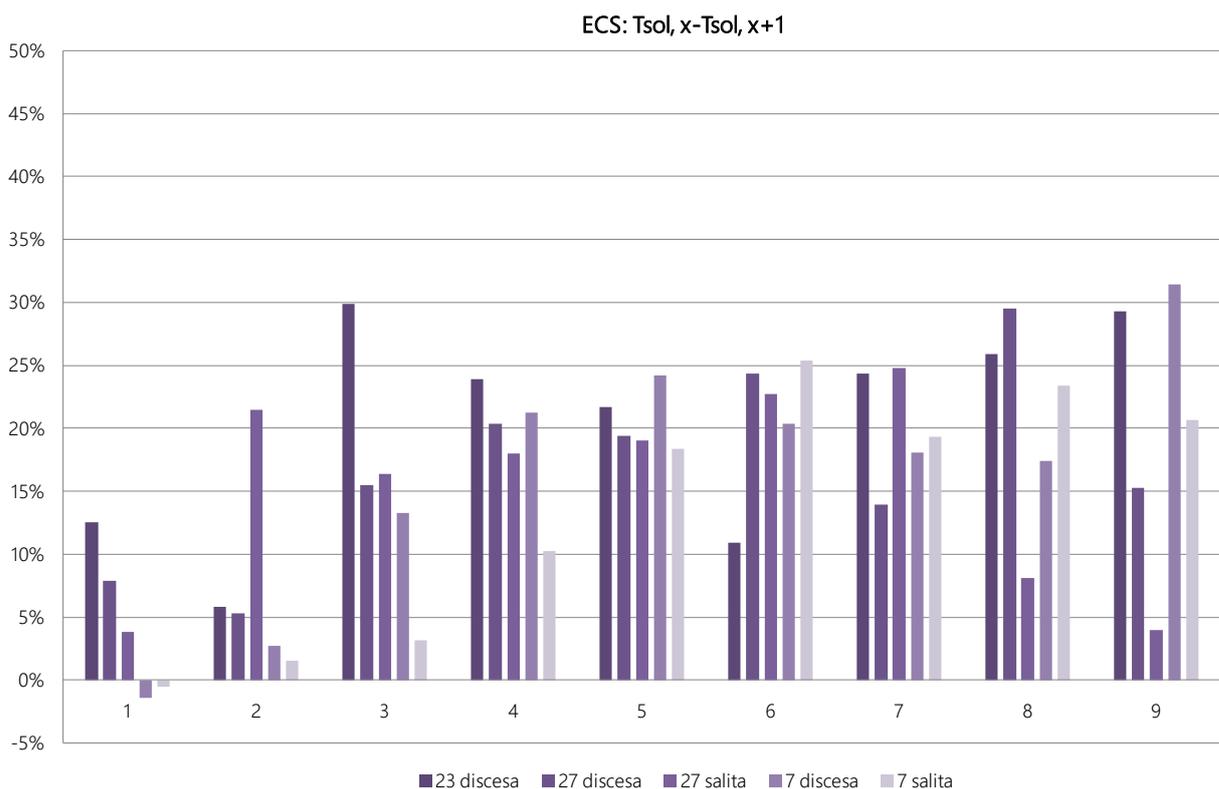
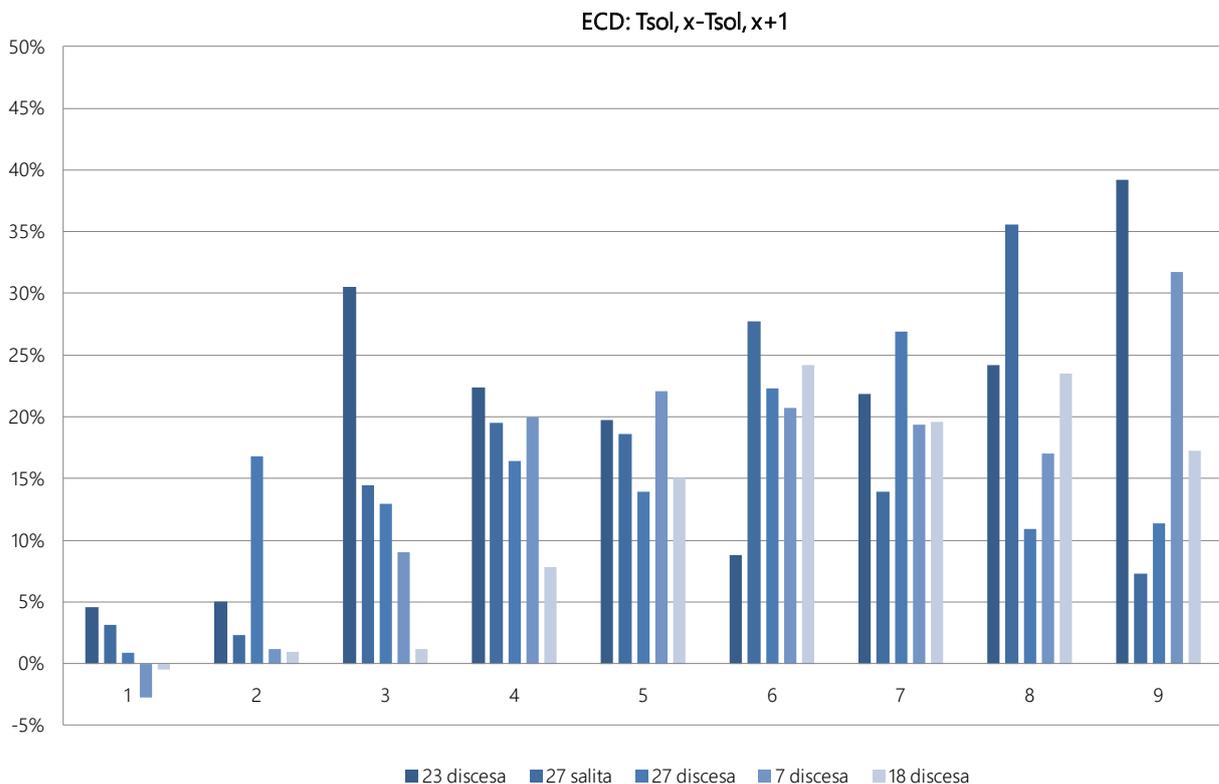
## Caratterizzazione degli stadi di colorazione

Il vetro elettrocromico è dotato di un controller manuale utile al settaggio di 10 diversi stadi di colorazione del vetro in base alla tensione inserita sulle due estremità della lastra. Tuttavia il passaggio da uno stato all'altro non risulta regolare con parametri di risulta ripetibili. Non è chiaro se tale fenomeno sia dovuto a una sorta di memoria ottica del vetro o al malfunzionamento del controller stesso che per come è conformato non permette il settaggio di un valore univoco di passaggio di corrente. In generale analizzando le trasmissioni solari è possibile identificare una curva con andamento simile a quella misurata in laboratorio su un modello di vetro EC di dimensioni ridotte.

Occorre considerare un margine di errore dovuto alle ridotte dimensioni (circa 68 x 68 cm) del vetro elettrocromico reale su cui sono state effettuate le misure. Esso subirà gli effetti della vicinanza del telaio ai sensori di misura, e l'influenza delle ombre portate dalla struttura in metallo e policarbonato che permette il fissaggio del vetro alla cella.

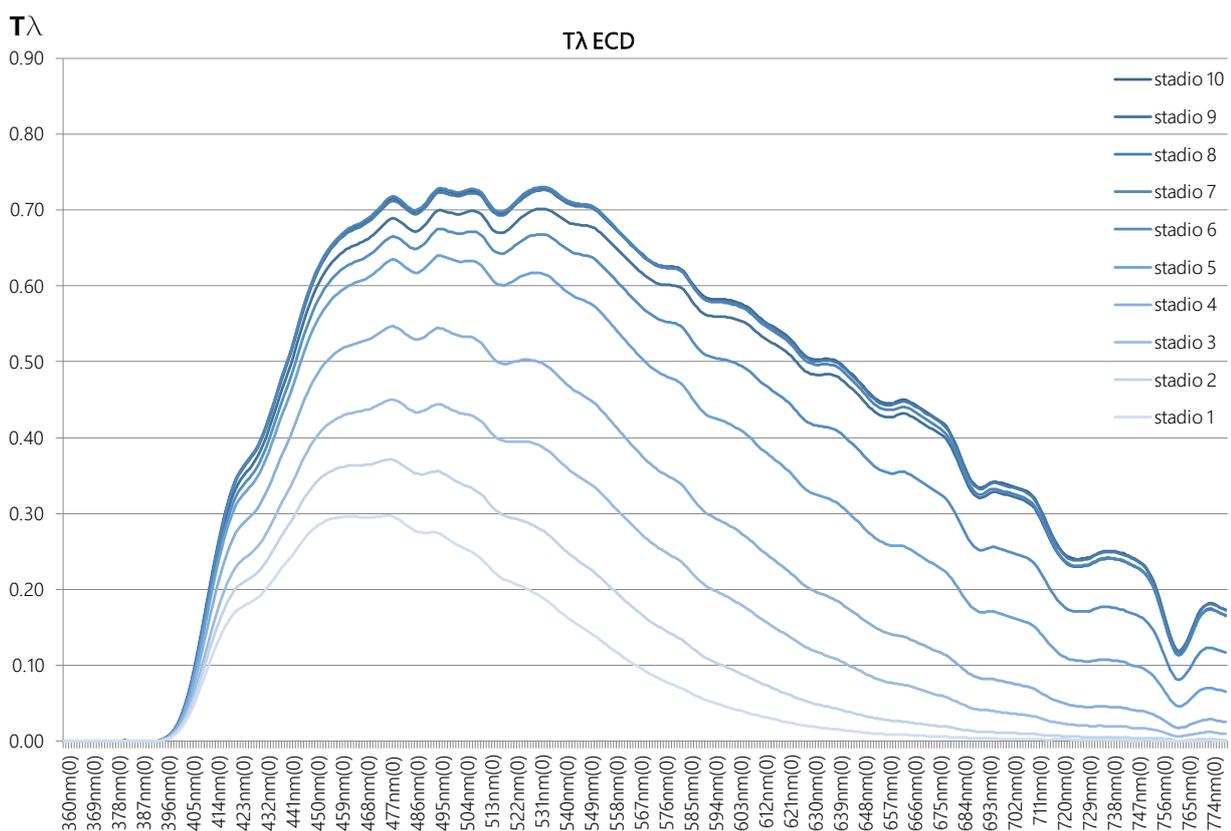
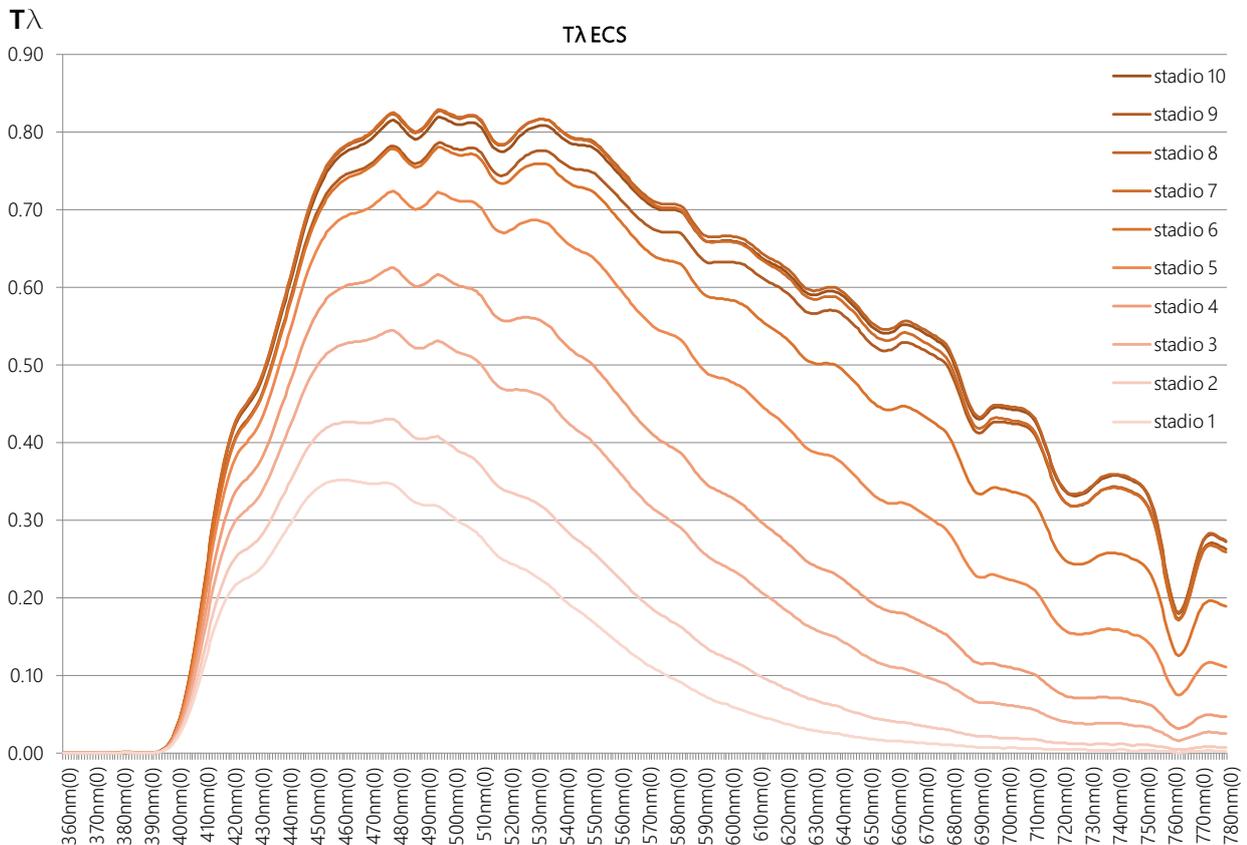


In generale esaminando i  $\Delta T_{sol}$  tra i vari stadi possiamo notare come lo switch tra i primi 2 stadi di norma produca una variazione molto ridotta nei valori di trasmissione: successivamente la variazione dei valori di trasmissione oscilla tra un 13% e un 22% per l'ECD e valori leggermente più alti e irregolari per l'ECS fino agli ultimi stadi. Diversamente il passaggio tra gli stadi 9-10 (massima colorazione) provoca delle variazioni percentuali più alte. Probabilmente la reazione chimico-fisica al passaggio di corrente non è proporzionale alla corrente stessa. I seguenti grafici indicano i valori percentuali assunti dal delta  $T_{sol}$  di due stadi prossimi. Non è possibile identificare una regolarità nè una ripetibilità per essi.

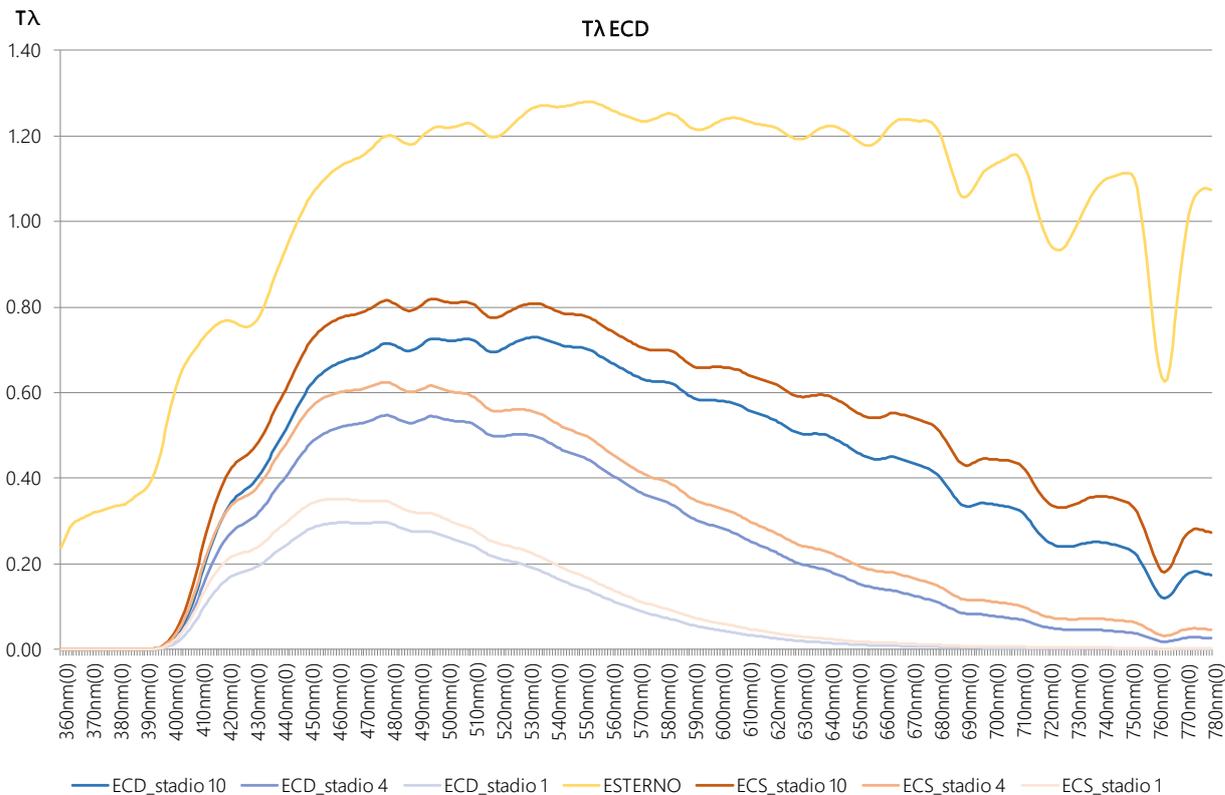


## 2.2.2 CARATTERIZZAZIONE VISIVA

A completare la caratterizzazione dei componenti è stata effettuata la misurazione delle trasmissioni visibili dei vetri statici (DGU, ECS, ECD). Tale misurazioni sono state effettuate mediante l'ausilio di due spettrofotometri, che oltre a registrare la composizione cromatica della radiazione trasmessa e l'illuminamento sul piano verticale della finestra restituisce mediante un'integrazione anche il valore di trasmissione della radiazione nel campo visibile.

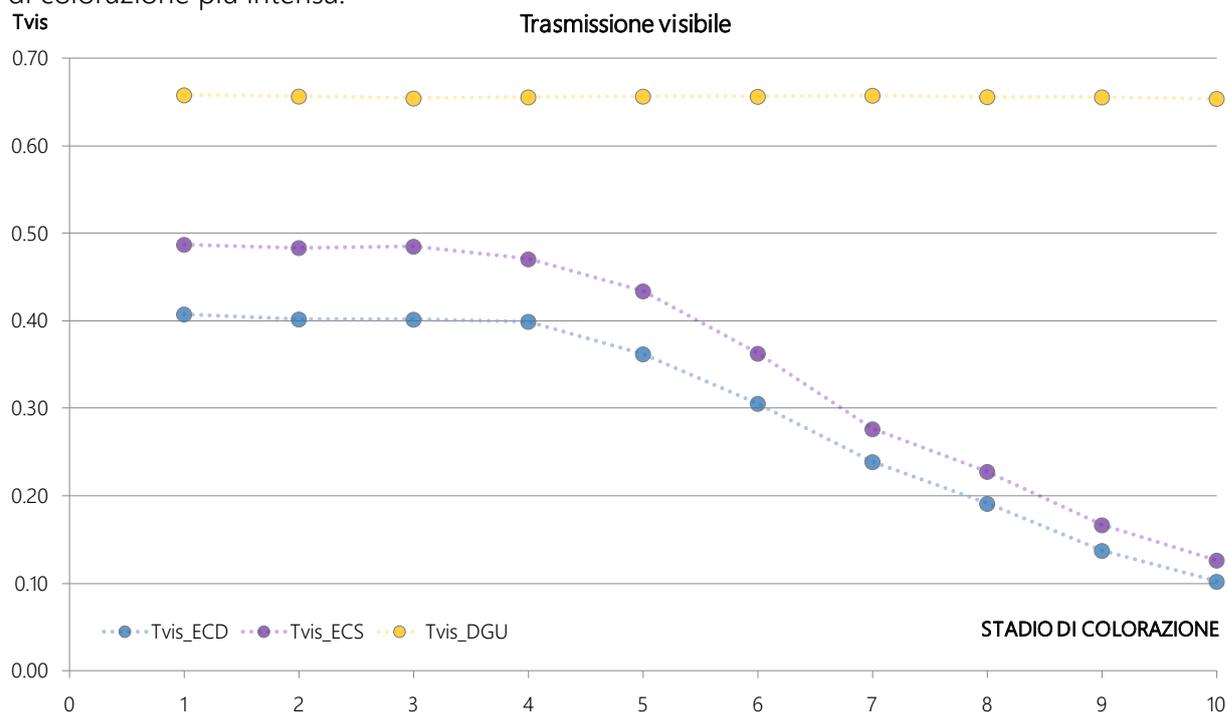


Il vetro trasmette gran parte della radiazione nella prima parte dello spettro visibile, corrispondente ai colori blu e verde; la radiazione nella parte della luce calda invece viene trasmessa in modo ridotto. Questo fatto è il responsabile della caratteristica colorazione bluastra del vetro e della luce che lo attraversa.

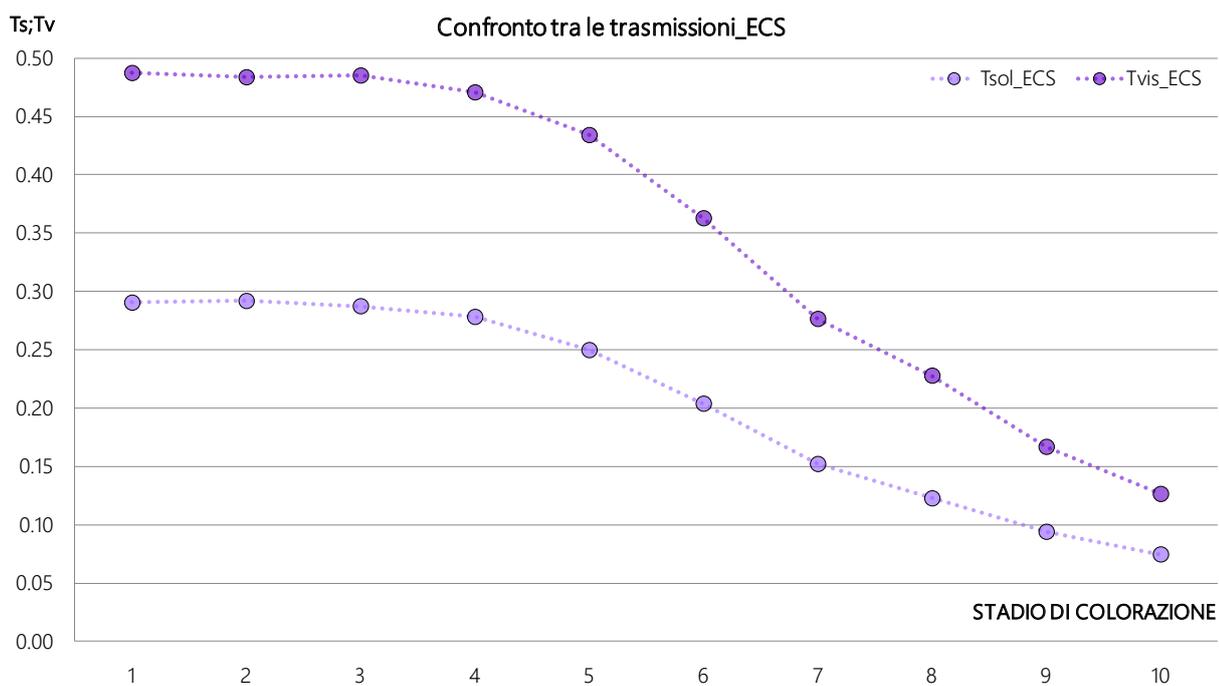
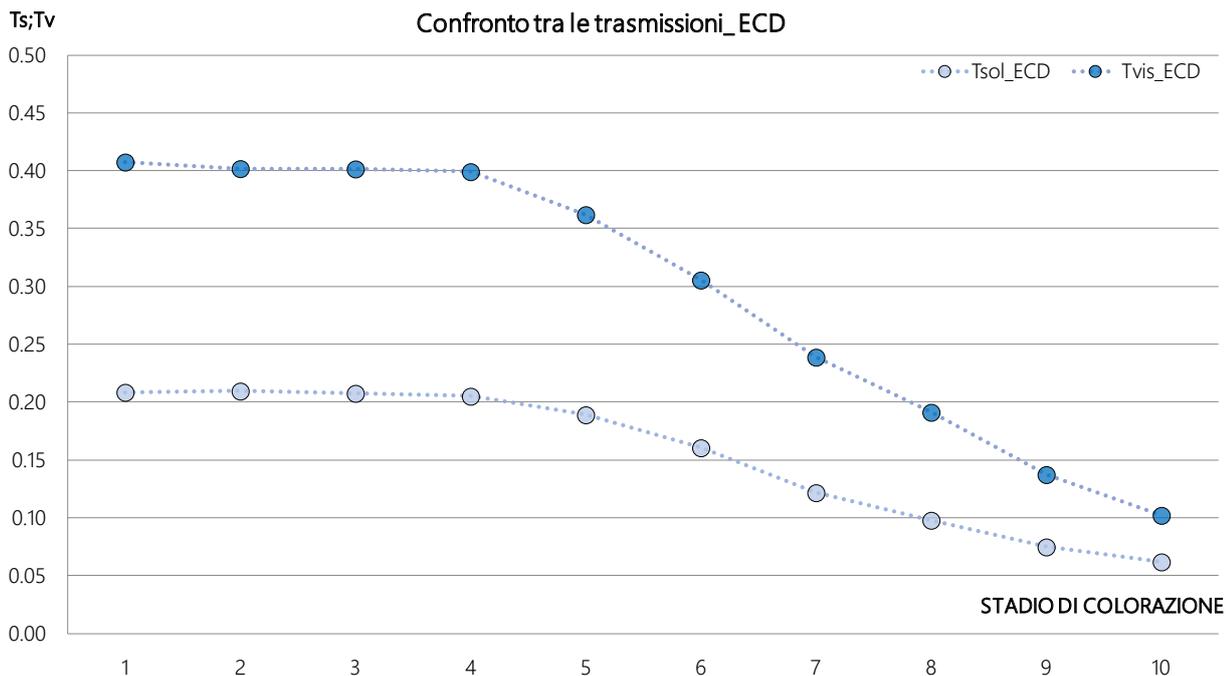


## TRASMISSIONE VISIBILE

Seguono i valori di  $T_{vis}$  per i tre vetri. Come per le trasmissioni solari anche nel caso successivo il delta tra le trasmissioni agli stadi più trasparenti è maggiore rispetto al delta misurato agli stadi di colorazione più intensa.



Nei grafici successivi è possibile confrontare gli andamenti della Trasmittanza solare e visibile dei due sistemi elettrocromici.

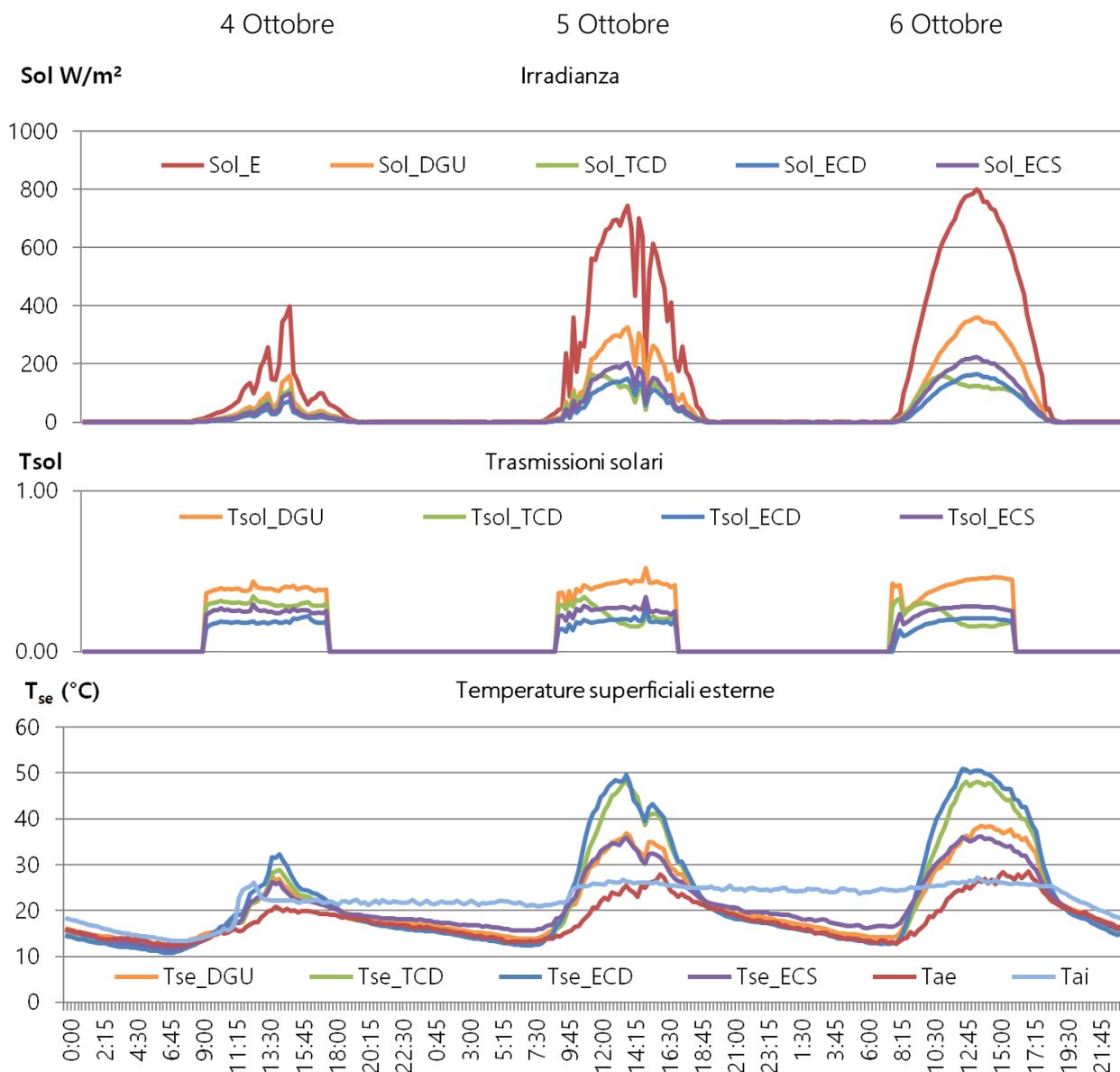


Date	Time	Ts_DGU	Tvis_DGU	Ts_ECD	Tvis_ECD	Ts_ECS	Tvis_ECS	stadio EC
	12:08:00	0,45	0,31	0,21	0,41	0,29	0,49	10
	12:12:00	0,46	0,31	0,21	0,40	0,29	0,48	9
	12:18:00	0,46	0,30	0,21	0,40	0,29	0,49	8
	12:22:00	0,46	0,30	0,21	0,40	0,28	0,47	7
	12:26:00	0,46	0,30	0,19	0,36	0,25	0,43	6
	12:36:00	0,46	0,29	0,16	0,31	0,20	0,36	5
	12:50:00	0,46	0,29	0,12	0,24	0,15	0,28	4
	12:56:00	0,46	0,29	0,10	0,19	0,12	0,23	3
	13:06:00	0,46	0,30	0,07	0,14	0,09	0,17	2
	13:16:00	0,47	0,31	0,06	0,10	0,07	0,13	1

## 2.2.3 TEMPERATURE SUPERFICIALI ESTERNE

Osserviamo l'andamento delle temperature superficiali esterne sui quattro sistemi vetrati considerando le tre giornate tipo con clima sereno, parzialmente nuvoloso e coperto.

### EC massima trasparenza



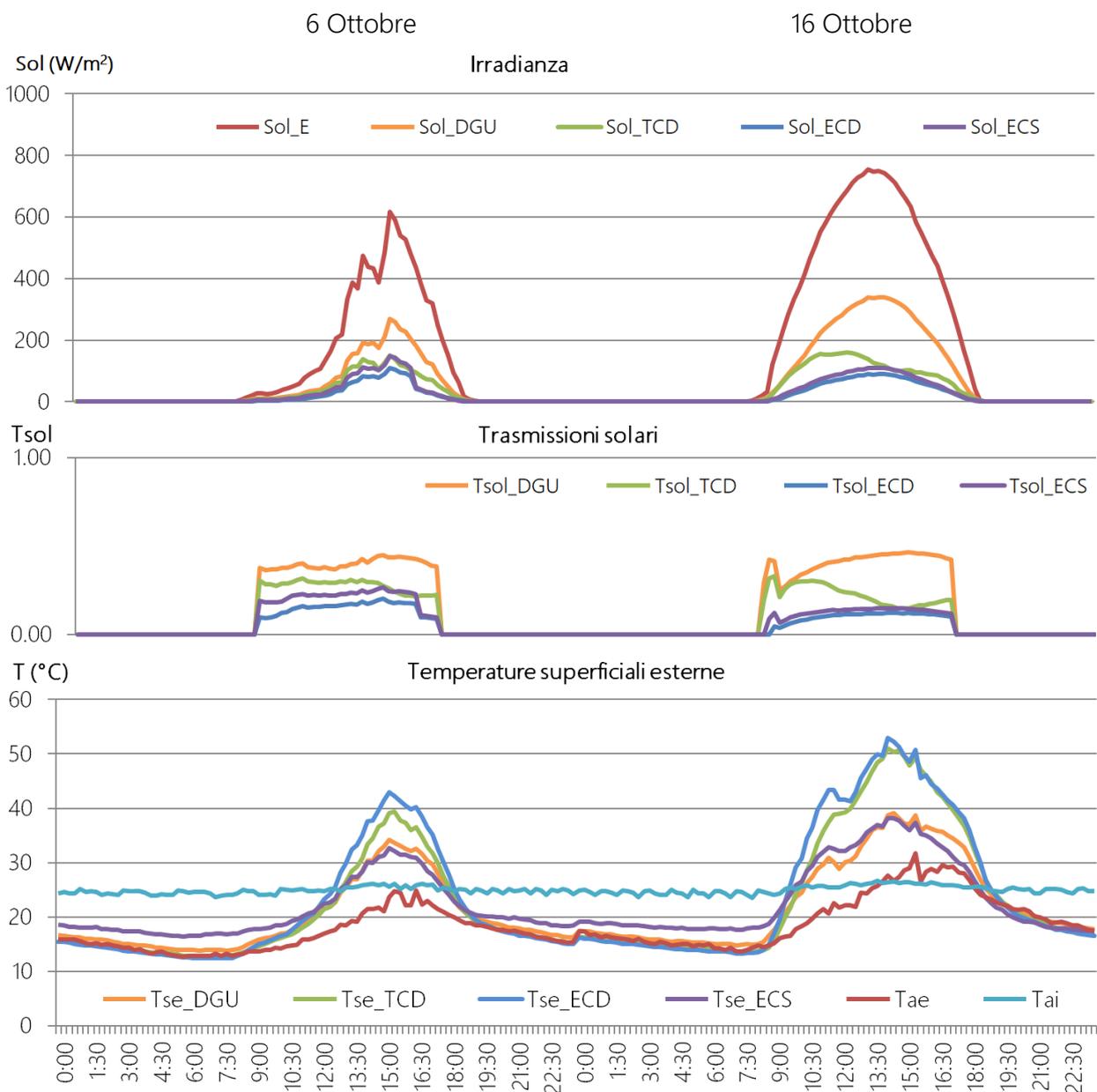
Quando il vetro elettrocromico è settato allo stadio di completa trasparenza è possibile osservare come gli andamenti delle temperature esterne del TCD e dell'ECD disegnino andamenti molto vicini e si distanzino di pochi gradi sia nelle giornate serene che in quelle coperte raggiungendo le temperature maggiori. Di norma l'elettrocromico risulta di poco più caldo del termocromico, soprattutto nella prima parte della giornata, quando il cambiamento di colore del secondo non è ancora ultimato. Seguono DGU ed ECS, anch'essi con andamenti prossimi: a livello di temperatura superficiale esterna l'assenza della camera crea effetti simili all'assenza di colorazione.

Nelle giornate coperte l'andamento dei quattro grafici è molto simile, in quelle soleggiate invece i grafici si dividono seguendo due tendenze: TCD ed ECD raggiungono temperature di 50°, ECS e DGU invece salgono fino a temperature di circa 35-38°. Tale differenza è da ricondurre sia al

fattore cromogenico che alla presenza della camera d'aria: in primo luogo la sensibile colorazione delle lastre favorisce l'assorbimento della radiazione solare e dunque l'aumento della temperatura esterna. L'assenza della camera invece rende la lastra singola maggiormente sensibile alla temperatura dell'aria interna dell'ambiente condizionato, pari a 26°C. In più il calore viene immediatamente rilasciato nell'ambiente e non ci sono fenomeni di re-irradiazione. È interessante notare che nella prima parte della mattina l'elettrocromico singolo risulta più caldo del DGU, ma la situazione a metà giornata si inverte, probabilmente per effetto della presenza della camera isolante che impedisce la dispersione del calore accumulato dalla lastra esterna.

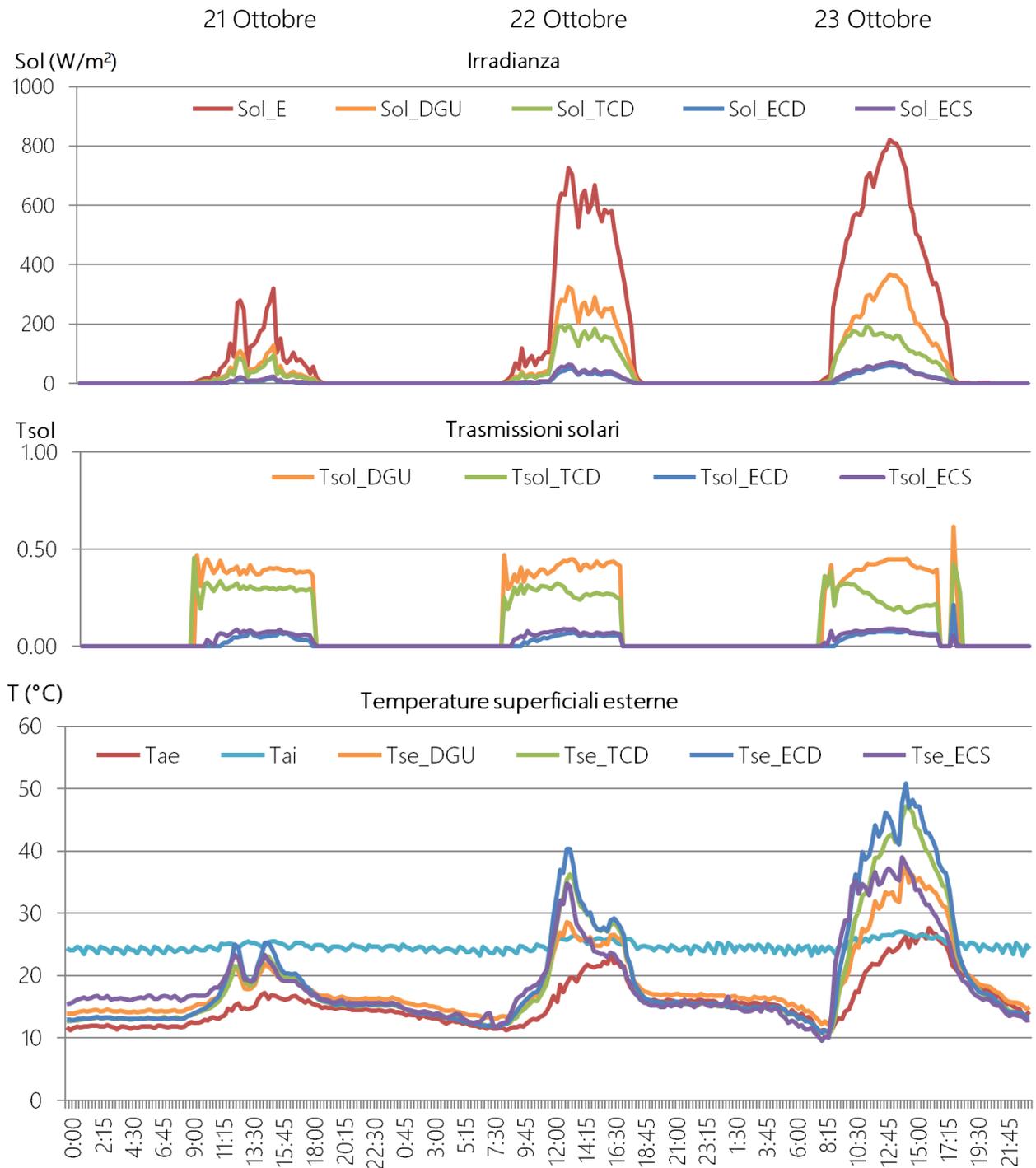
L'assenza di colorazione nel DGU fa in modo che la sua temperatura rimanga più bassa dei rispettivi sistemi con camera.

### EC colorazione intermedia



Quando il vetro elettrocromico è settato a uno stadio di colorazione intermedia è possibile osservare come gli andamenti delle temperature esterne del TCD e dell'ECD, benché sempre molto vicini, presentino un delta maggiore rispetto all'esempio precedente.

## EC massima colorazione



Confrontando i dati delle giornate coperte vediamo che qualunque sia lo stadio di colorazione del vetro elettrocromico, gli andamenti dei quattro grafici sono gli stessi; solo l'ECD in alcuni intervalli temporanei mostra una temperatura maggiore delle altre lastre: persiste un minimo fenomeno di assorbimento della radiazione solare che riscalda la lastra. Tale differenza di temperatura è tuttavia decisamente trascurabile.

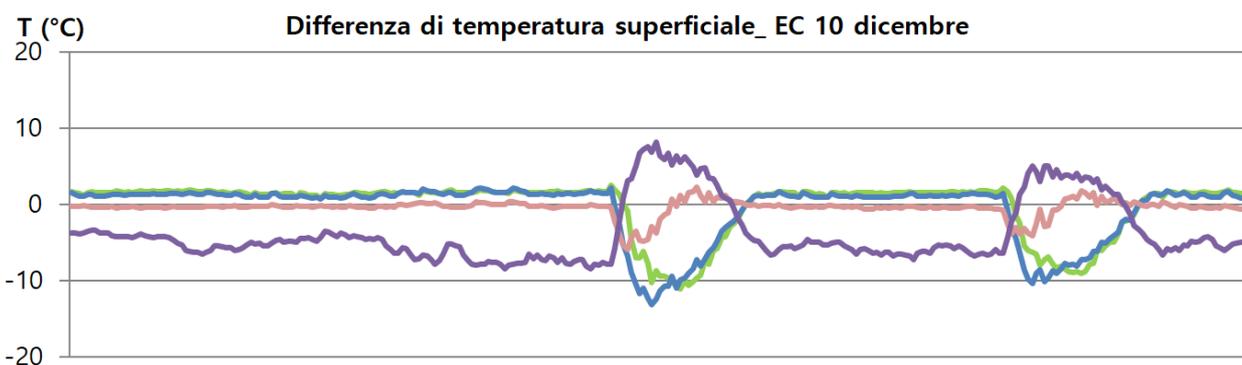
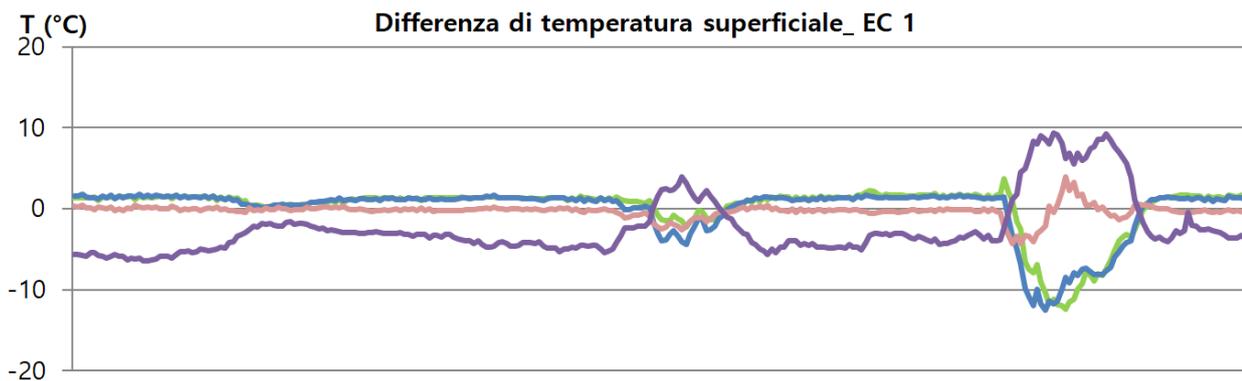
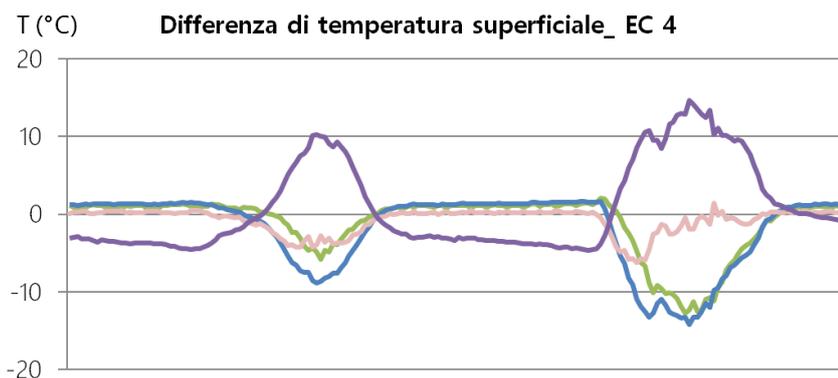
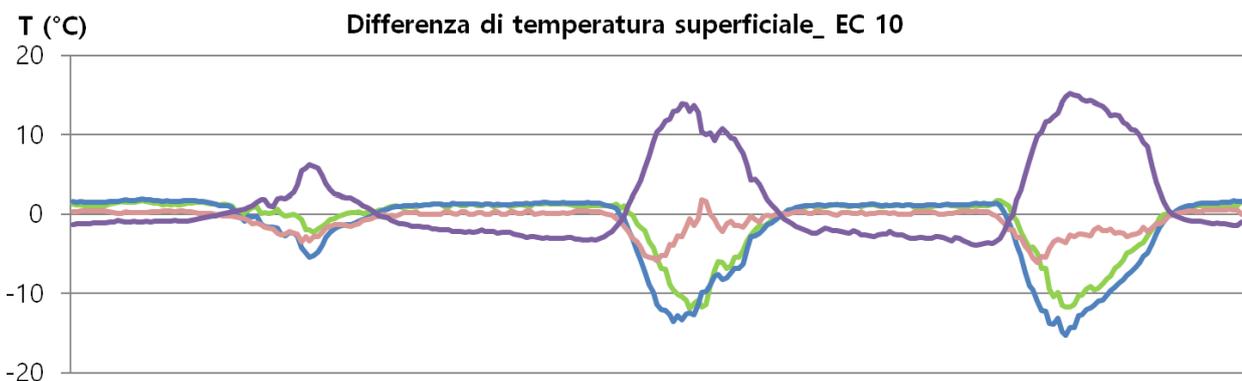
La lastra elettrocromica singola nel periodo notturno si distacca leggermente avvicinandosi alla temperatura dell'ambiente interno, maggiore o minore dell'esterno a seconda della stagione.

Allo stadio di massima colorazione la temperatura superficiale esterna dell'ECD è di poco superiore a quella del vetro termocromico, mantenendosi però intorno ai 50°. Questo dato indica

un fenomeno particolarmente interessante: il cambiamento di colore, a differenza di quanto si potrebbe ipotizzare, non incide in modo sensibile sulla temperatura della lastra esterna.

In generale l'andamento irregolare della temperatura esterna, che presenta frequenti picchi, massimi e minimi, influenza parzialmente le temperature superficiali dei vetri esterni. Essi infatti presentano, con un più o meno evidente ammortizzamento, l'andamento della TAE. Il TCD è il vetro che si distacca maggiormente dall'andamento della T<sub>ae</sub> per il fenomeno termocromico.

— Tse\_DGU-Tse\_TCD    — Tse\_DGU-Tse\_ECD    — Tse\_TCD-Tse\_ECD    — Tse\_ECD-Tse\_ECS

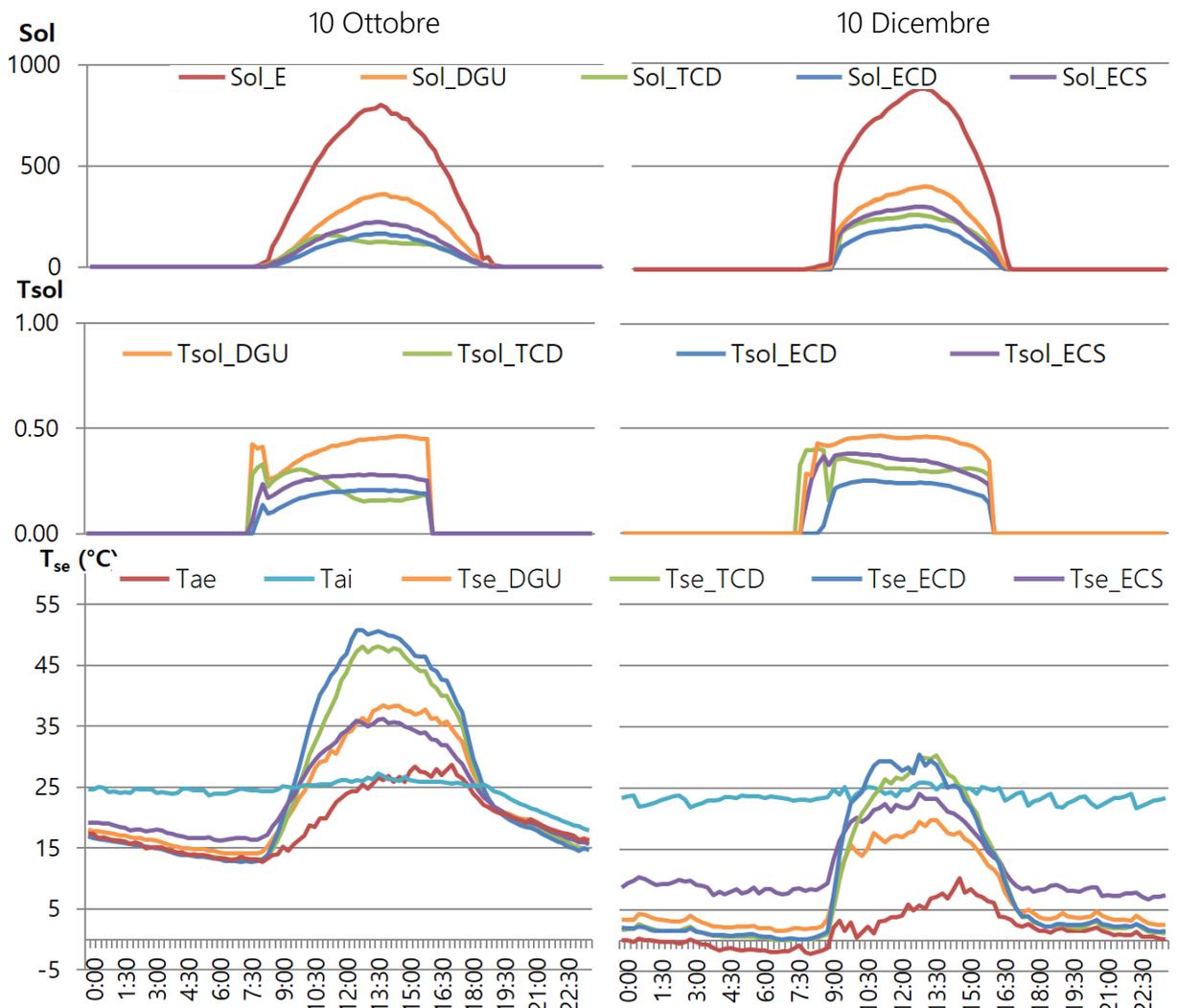


Il DGU durante il periodo soleggiato della giornata mantiene temperature superficiali più basse sia del TCD (circa 12° di delta) che dell'ECD (fino a 15° di delta), fenomeno dovuto al diverso fattore di assorbimento causato dalla colorazione del vetro. Com'è possibile osservare dai grafici questo delta non subisce ampie variazioni con il cambiamento di colore del vetro elettrocromico: il fattore più incidente su tale variazione è invece la temperatura esterna (come si può notare esaminando l'andamento delle temperature con vetro EC settato alla massima trasparenza in Ottobre e Dicembre).

Nel periodo notturno tutti i vetro-camera presentano temperature simili, mentre l'ECS si distacca dagli altri andamenti per le ragioni spiegate precedentemente (vedere pag 38). Nel periodo diurno l'ECD risulta di poco più caldo rispetto al TCD, e molto più caldo dell'ECS (fino a 15 ° di delta).

### INFLUENZA DELLE DIVERSE MODALITÀ DI TRASMISSIONE DI CALORE SULLE LASTRE

Esaminando il comportamento delle temperature superficiali esterne con diverse situazioni climatiche si può identificare la predominanza dell'effetto della trasmissione di calore per conduzione e convezione dovuta alla temperatura ambientale rispetto alla trasmissione di calore dovuta all'irraggiamento causato dalla radiazione solare globale che colpisce la lastra in vetro. Sono state selezionate due giornate con valori di Irradianza esterna simili in due diversi momenti dell'anno. Nel primo caso le temperature esterne superano le temperature di raffreddamento interno della cella; nel secondo risultano di molto inferiori a quelle di raffreddamento.

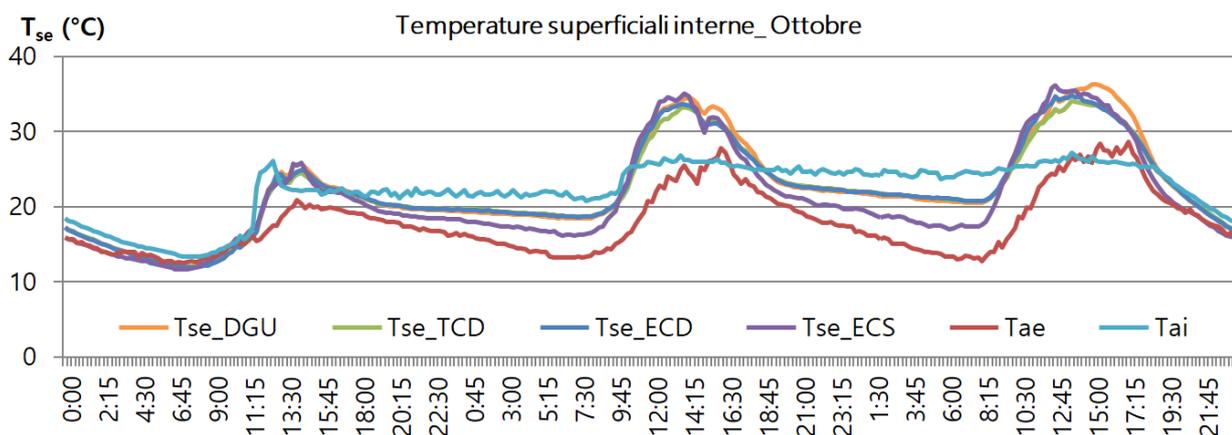


Dai grafici a confronto è possibile vedere chiaramente come il fattore preponderante sulla temperatura superficiale esterna risulta la temperatura ambientale. Il DGU è ovviamente il vetro che risente maggiormente di essa e risulta il vetro più freddo nel caso invernale. Questo è dovuto alla colorazione chiarissima della lastra e al conseguente basso fattore di assorbimento. I vetri elettrocromici (considerando anche che nell'ultimo caso il vetro è passato da uno stadio di intensa colorazione a più chiaro) si distaccano dall'andamento del DGU a causa del maggiore fattore di assorbimento, tuttavia la loro temperatura nel caso invernale è comunque decisamente inferiore ai casi precedenti. Un'ulteriore conferma dell'ipotesi prima presentata nasce dall'osservazione del comportamento del vetro termocromico: è possibile notare che man mano che la temperatura esterna diminuisce il fenomeno di cambiamento di colore del vetro termocromico è sempre meno presente.

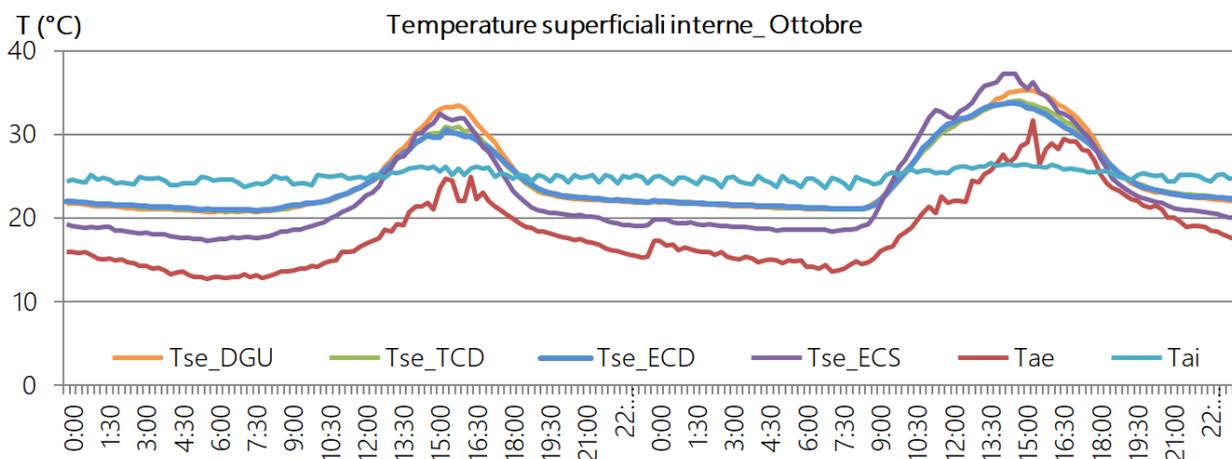
## 2.2.4 TEMPERATURE SUPERFICIALI INTERNE

Osserviamo l'andamento delle temperature superficiali interne sui quattro sistemi vetrati considerando le tre giornate tipo con clima sereno, parzialmente nuvoloso e coperto.

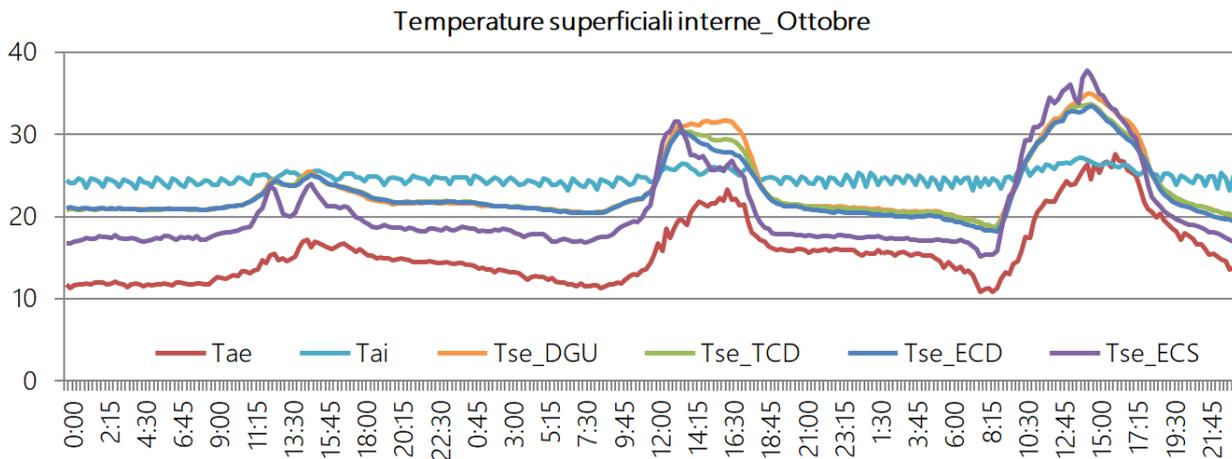
### EC massima trasparenza



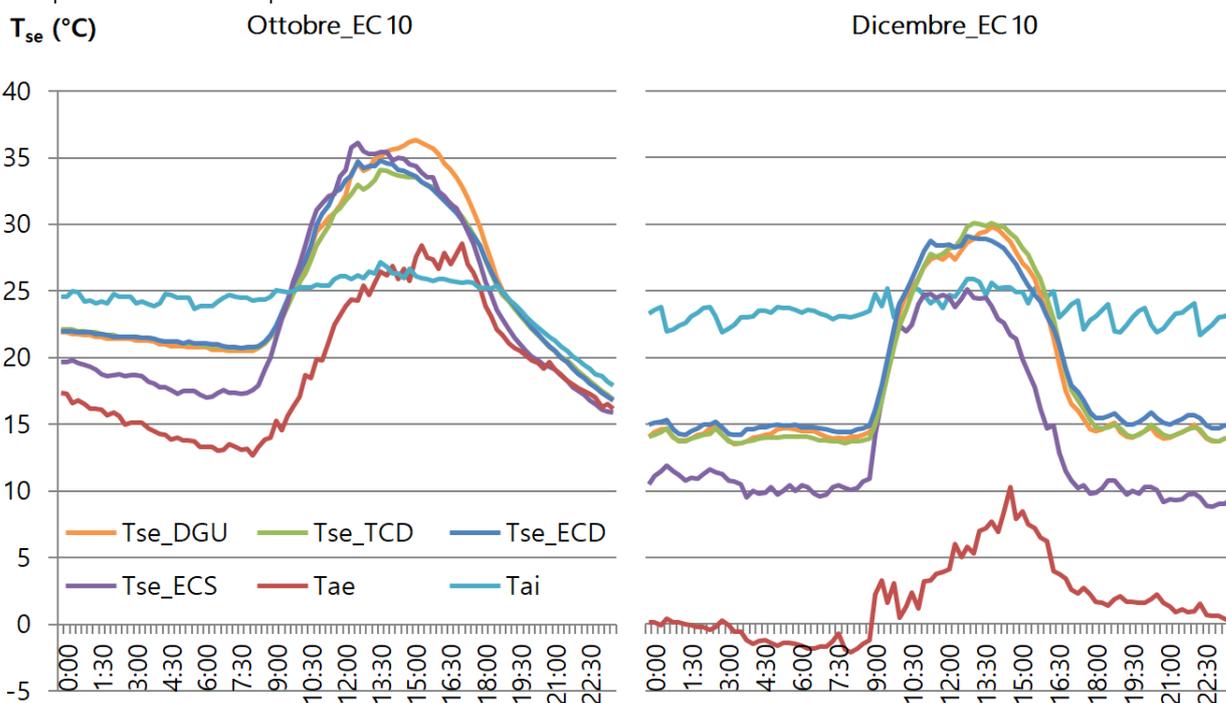
### EC colorazione intermedia



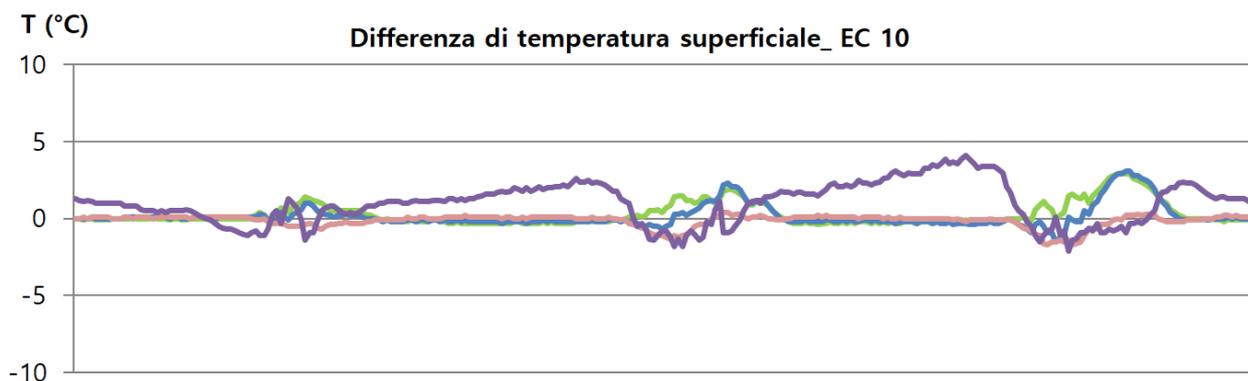
### EC massima colorazione



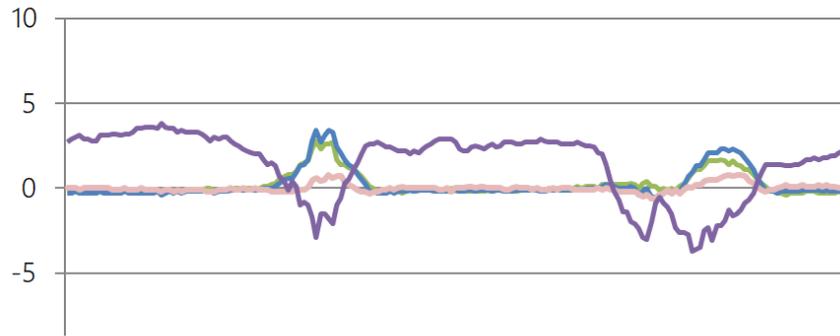
Gli andamenti dei grafici dei quattro sistemi vetrati sono molto simili e vicini: la temperatura massima raggiunta nei momenti di picco vira intorno ai 35°C. Nel periodo diurno i vetri ricalcano lo stesso percorso nella mattina, mentre nelle ore centrali il DGU risulta più caldo rispetto agli altri vetro-camera. Questo fenomeno indica che l'arrivo della radiazione diretta sulla lastra interna è decisamente più influente sia del re-irraggiamento dato dalla lastra esterna colorata alla lastra interna, sia della parte di calore trasmesso per conduzione e convezione dovuta alla maggiore temperatura della superficie esterna.



Con l'abbassarsi della temperatura le temperature superficiali dei vetri camera si avvicinano sino a percorrere andamenti praticamente identici.

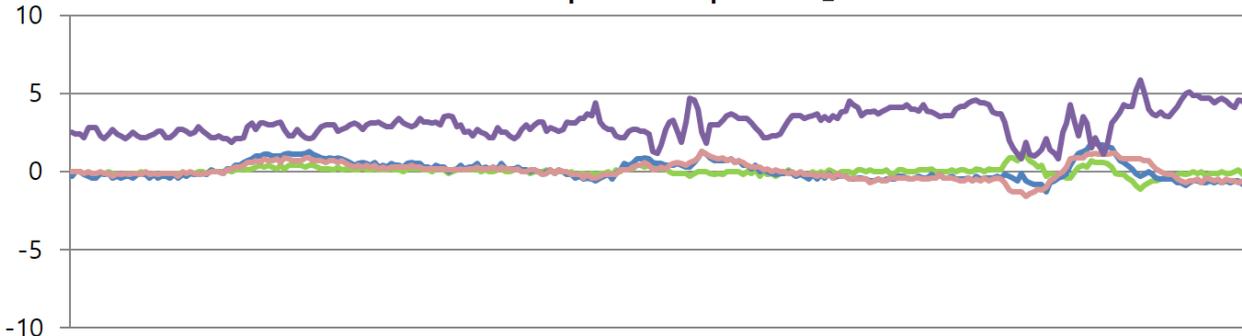


T (°C) Differenza di temperatura superficiale\_EC 4

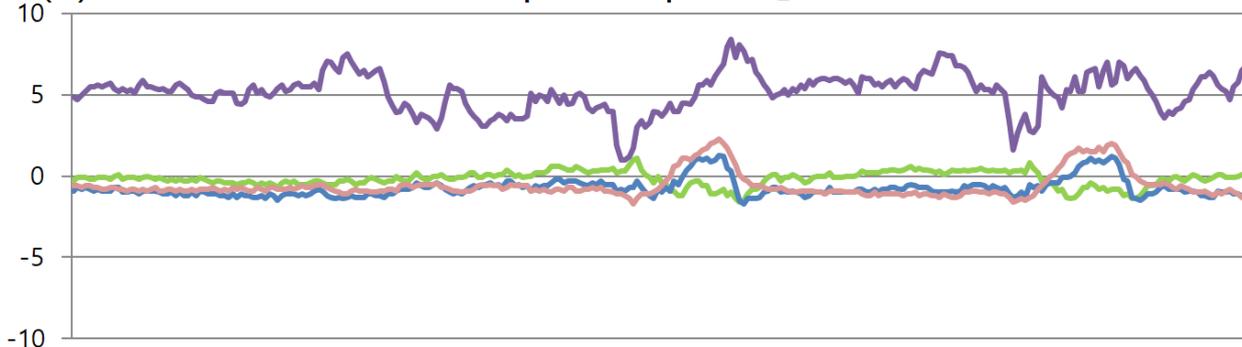


— Tsi\_DGU-Tsi\_TCD — Tsi\_DGU-Tsi\_ECD — Tsi\_TCD-Tsi\_ECD — Tsi\_ECD-Tsi\_ECS

T (°C) Differenza di temperatura superficiale\_EC 1



T (°C) Differenza di temperatura superficiale\_EC 10 dicembre

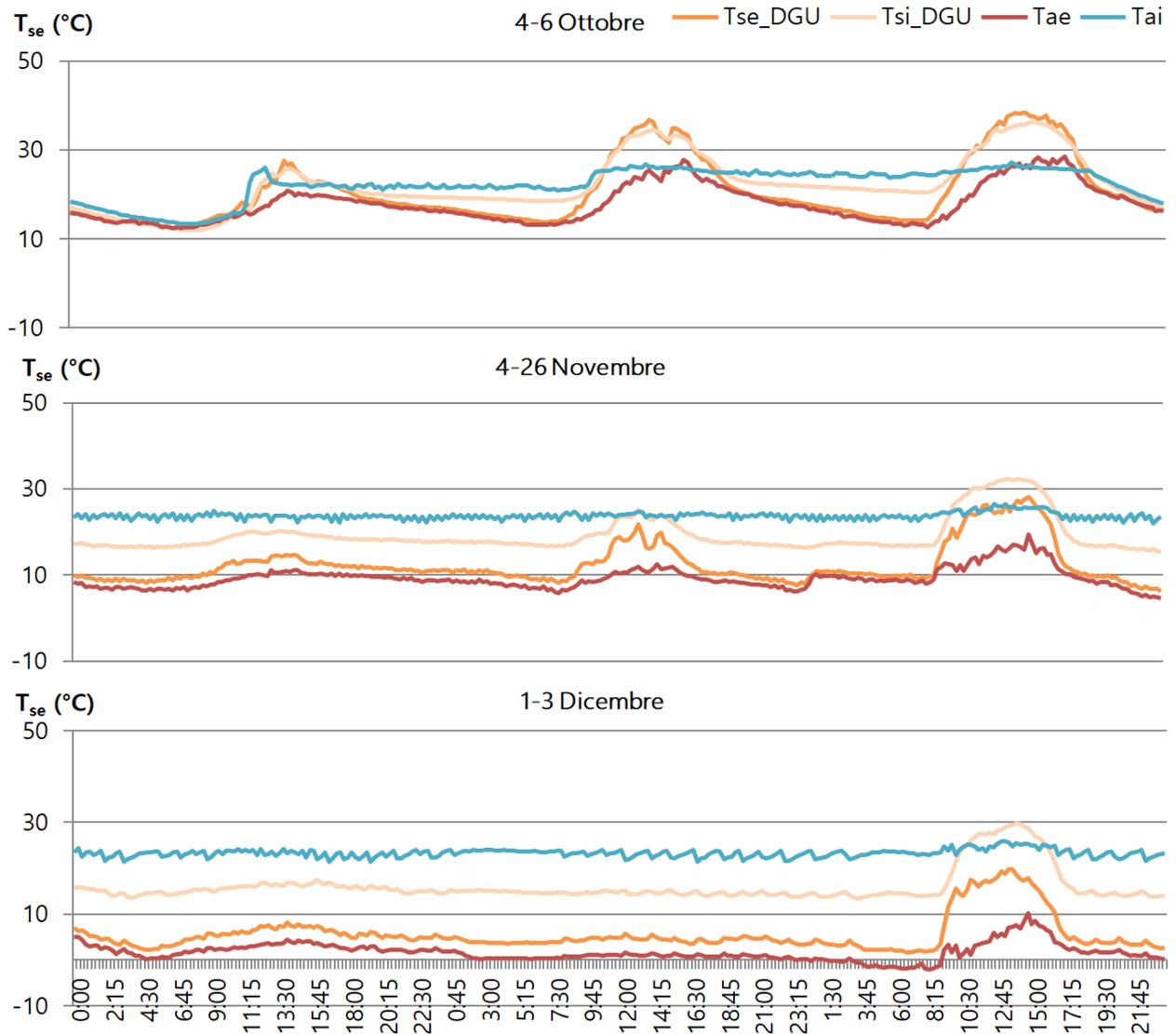


Si può notare come il DGU risulti sempre più caldo degli altri vetri-camera in periodo diurno estivo-autunnale; nel periodo invernale il vetro termocromico invece supera come temperatura il vetro chiaro, probabilmente perché al maggiore passaggio della radiazione solare attraverso la lastra, che con basse temperature cambia in maniera minima colore, si somma l'irraggiamento dovuto alla comunque maggiore temperatura della lastra esterna.

L'analisi delle temperature superficiali interne apre la strada ad alcune riflessioni generali sul tema del comfort termico. Tra i fattori che incidono sulla percezione di comfort termico si trova innanzitutto la temperatura radiante, frutto di una media pesata delle temperature delle superfici. In periodo estivo-autunnale la temperatura interna delle lastre termocromica ed elettrocromica risulta sempre uguale o minore di alcuni gradi rispetto a quella del vetro chiaro di riferimento, qualsiasi sia lo stato di colorazione dei due vetri. Inoltre la colorazione dei vetri diminuisce la quantità di radiazione solare entrante, soprattutto nella parte infrarossa, come si può notare dalla caratterizzazione fotometrica dei vetri presentata nelle pagine precedenti. Dunque è ragionevole ipotizzare che l'effetto dell'utilizzo dei vetri cromogenici sul comfort termico i vetri cromogenici non sia negativo. Nel caso invernale, dove una più alta temperatura superficiale interna può risultare un fattore positivo, i tre tipi di vetro camera mostrano valori misurati quasi identici.

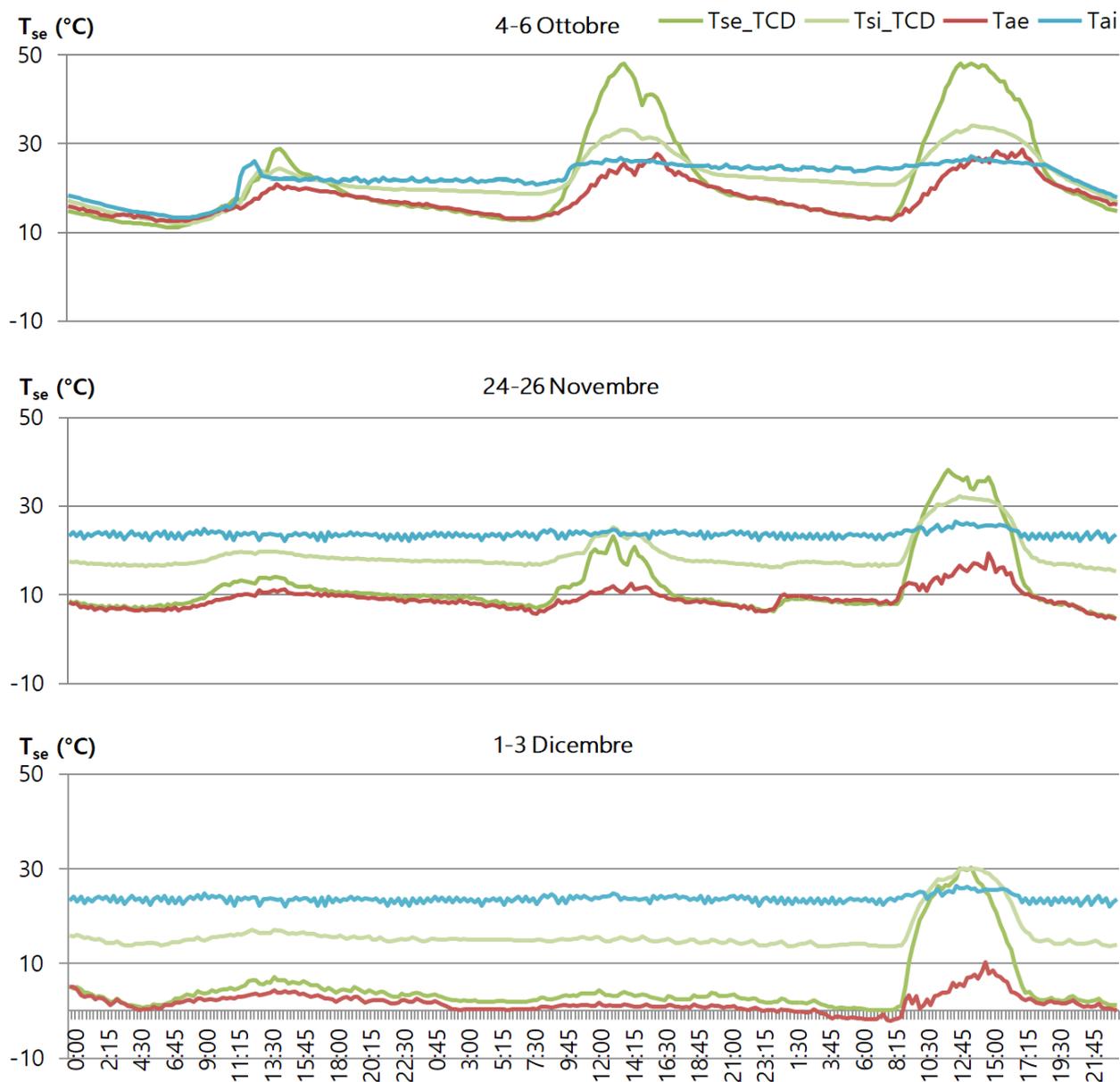
## 2.2.5 CONFRONTO TRA TEMPERATURE SUPERFICIALI INTERNE ED ESTERNE

### DGU



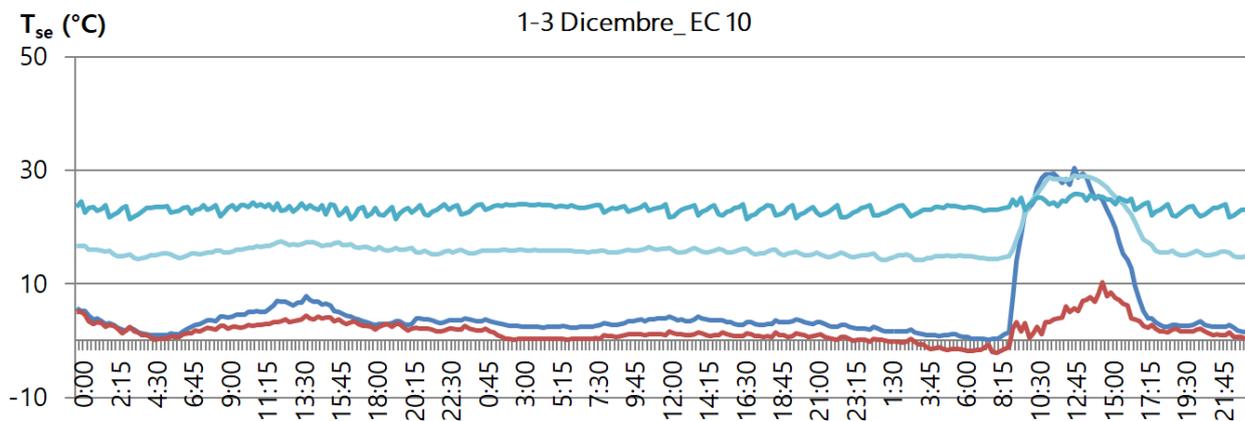
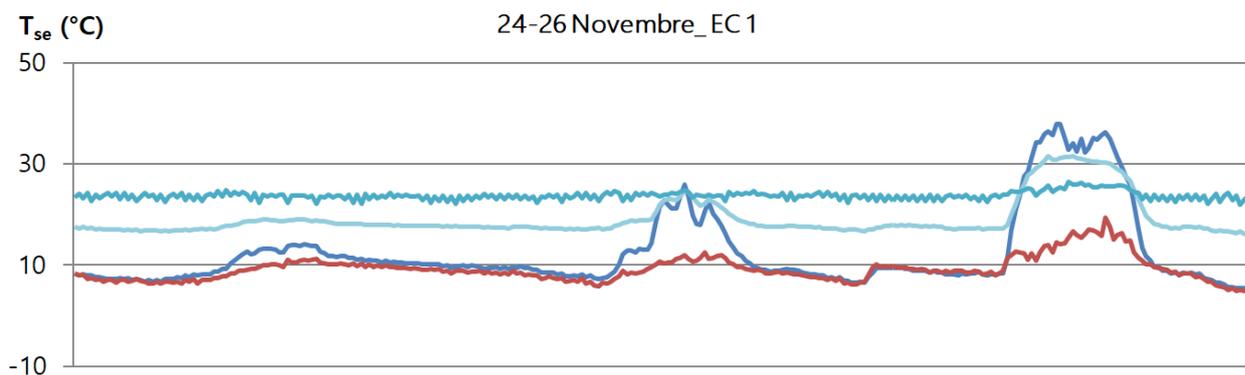
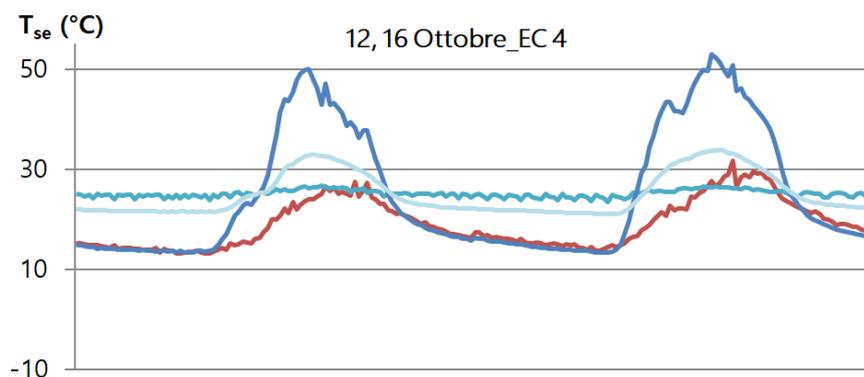
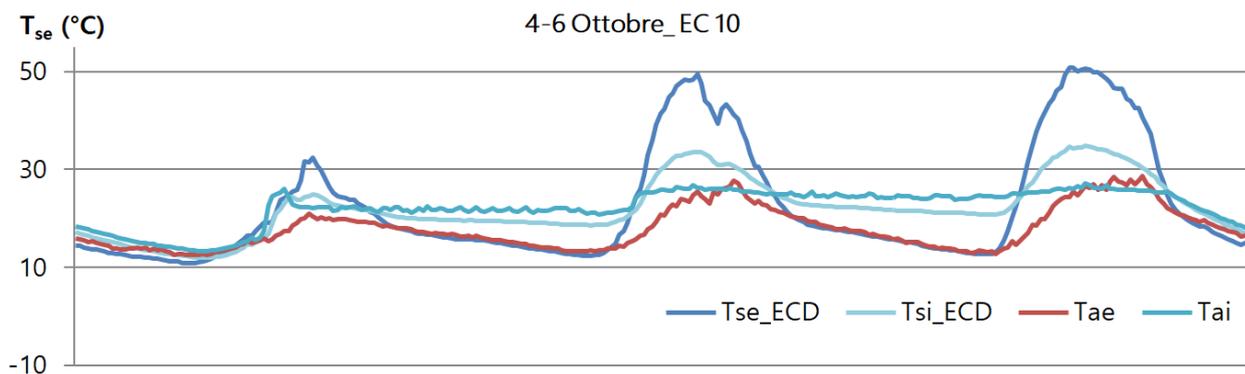
La differenza tra le temperature superficiali è molto ridotta quando la temperatura dell'aria esterna raggiunge i livelli di quella interna; se invece le due temperature dell'aria sono separate da un grosso intervallo anche le temperature superficiali presentano un delta percettibile. La  $T_{se}$  risulta pesantemente influenzata da  $T_{ae}$ , mentre quella interna subisce tale influenza in dose decisamente minore, mantenendosi nelle giornate serene sempre tra i 30° e i 35°. È interessante notare che nel periodo freddo, con  $T_{ae} < T_{ai}$  e  $T_{se} < T_{ai}$ ; la temperatura superficiale interna è maggiore della temperatura dell'aria interna ( $T_{si} > T_{ai}$ ), fattore probabilmente dovuto all'influenza della radiazione diretta sulla lastra interna. La  $T_{si}$  notturna si mantiene tra  $T_{ai}$  e  $T_{se} \approx T_{ae}$ .

## TCD



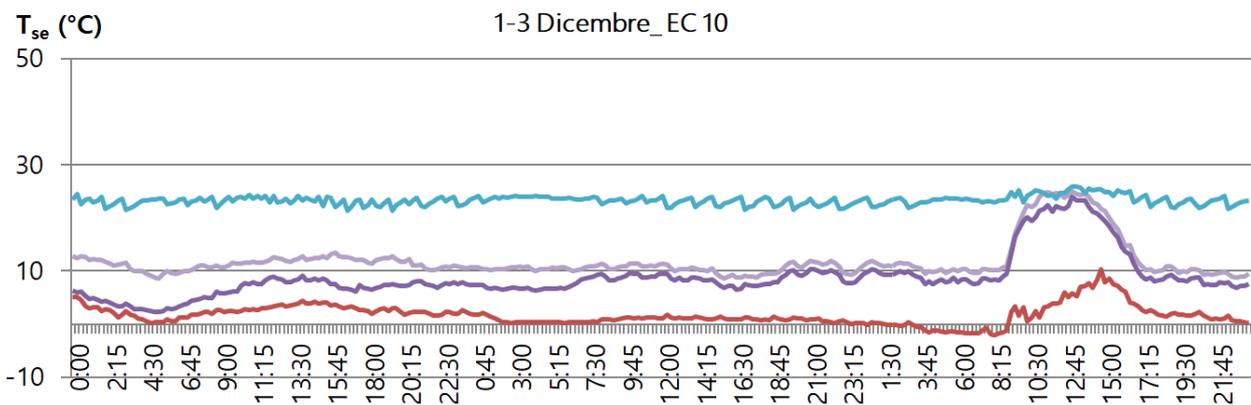
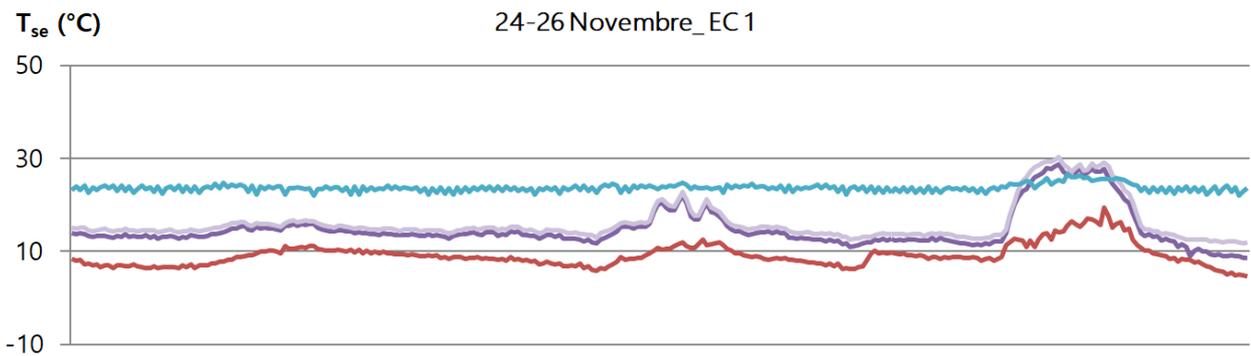
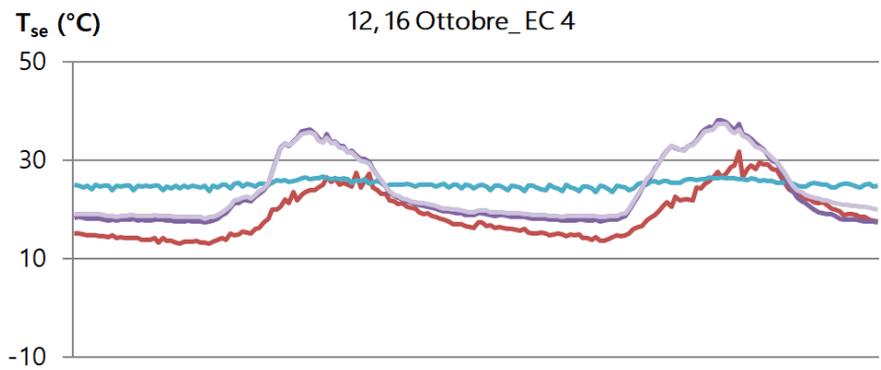
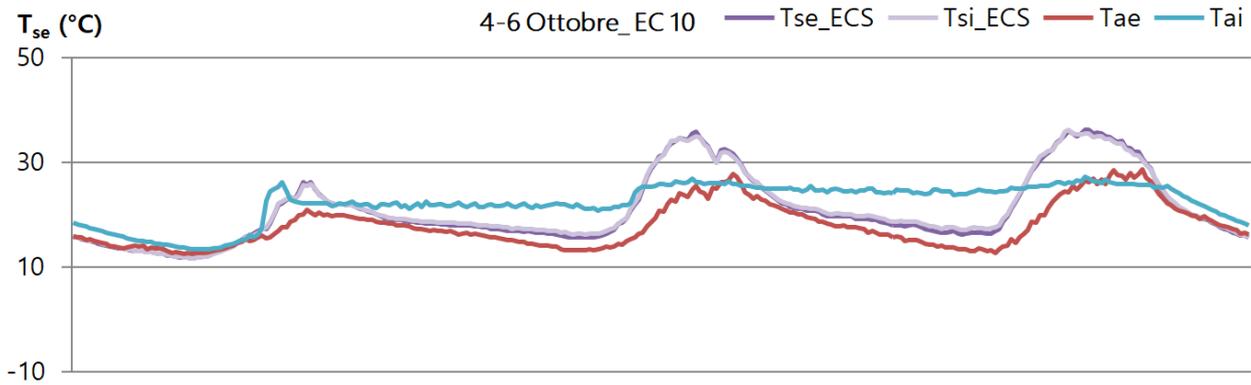
Nel caso del vetro termocromico la temperatura superficiale esterna in periodo estivo è sempre maggiore di quella interna, con un delta che può arrivare a 18°C. L'andamento della Tsi si rivela essere molto più omogeneo rispetto a quello esterno con un notevole ammortizzamento dei picchi. Nel periodo invernale diurno le lastre interna ed esterna raggiungono le medesime temperature.

## ECD



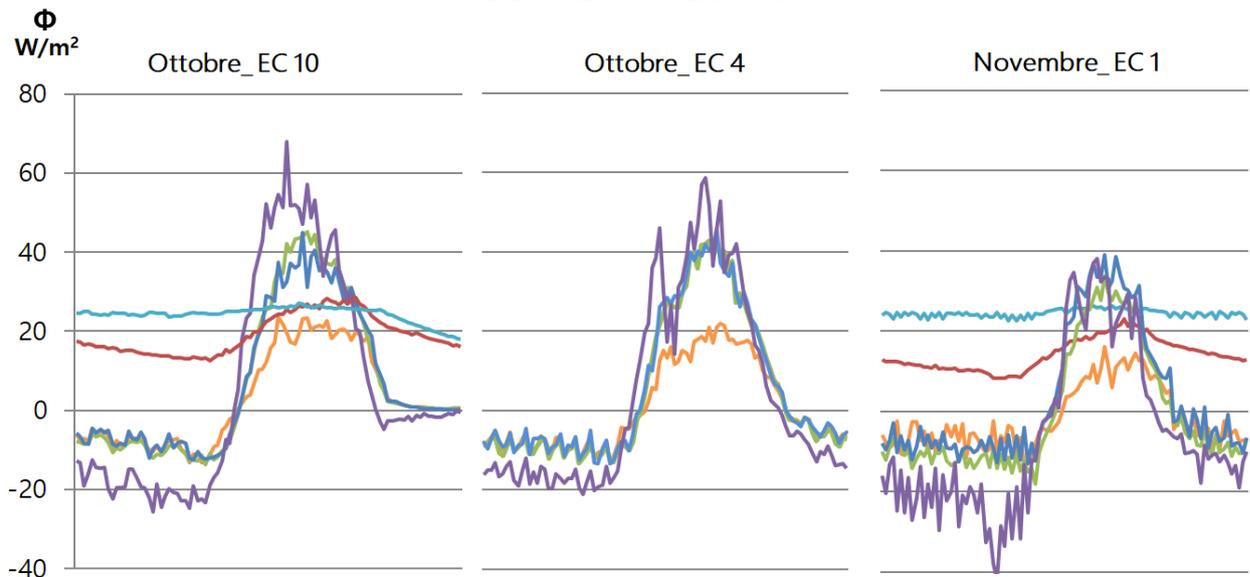
Nel periodo diurno il delta tra TSe e TSi è notevole: con tempo sereno si arriva fino a una differenza di 19,5°C. Come nel caso del vetro termocromico si registra un notevole ammortizzamento dei picchi e nel periodo invernale diurno le lastre interna ed esterna raggiungono le medesime temperature.

## ECS



L'ECS presenta la quasi totale coincidenza delle  $T_{se}$  e  $T_{si}$ , fenomeno dovuto all'assenza della camera. Tuttavia quando si registra un grande delta la temperatura dell'aria esterna e quella dell'aria interna anche le due temperature superficiali si distaccano di un minimo intervallo.

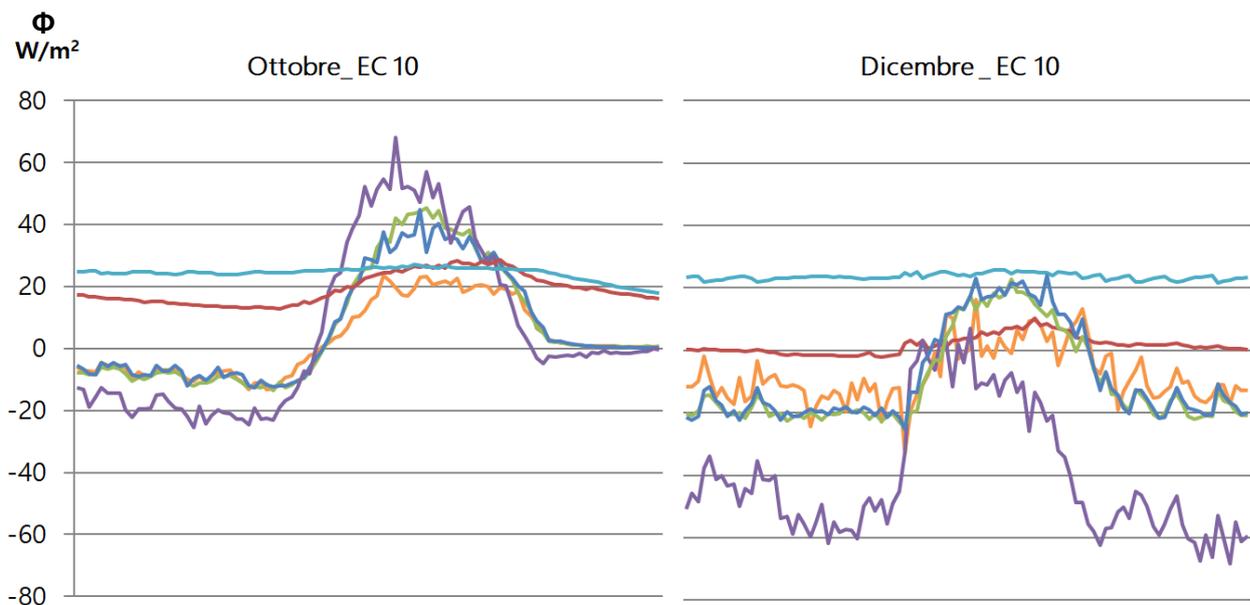
## 2.2.6 FLUSSI TERMICI



Il flusso termico che raggiunge i valori maggiori sia in positivo che in negativo risulta quello che attraversa l'ECS. Infatti nonostante il delta Tse-Tsi sia quasi nullo esso è caratterizzato da alta conducibilità termica.

$$\Phi = \lambda(\Delta T^* S) / s$$

Seguono ECD e TCD. Esaminando la formula del flusso termico se ne comprende il motivo: il delta Tse-Tsi raggiunge i valori più alti nei vetri cromogenici, poiché la temperatura della lastra esterna colorata raggiunge temperature decisamente più alte rispetto alla lastra interna. Dunque risulta più alto il valore di flusso termico dovuto a conduzione, convezione e irraggiamento. Il DGU è il sistema vetrato che minimizza il flusso attraverso il componente trasparente: esso infatti unisce un basso valore di conducibilità termica a un delta Tse-Tsi molto ridotto.



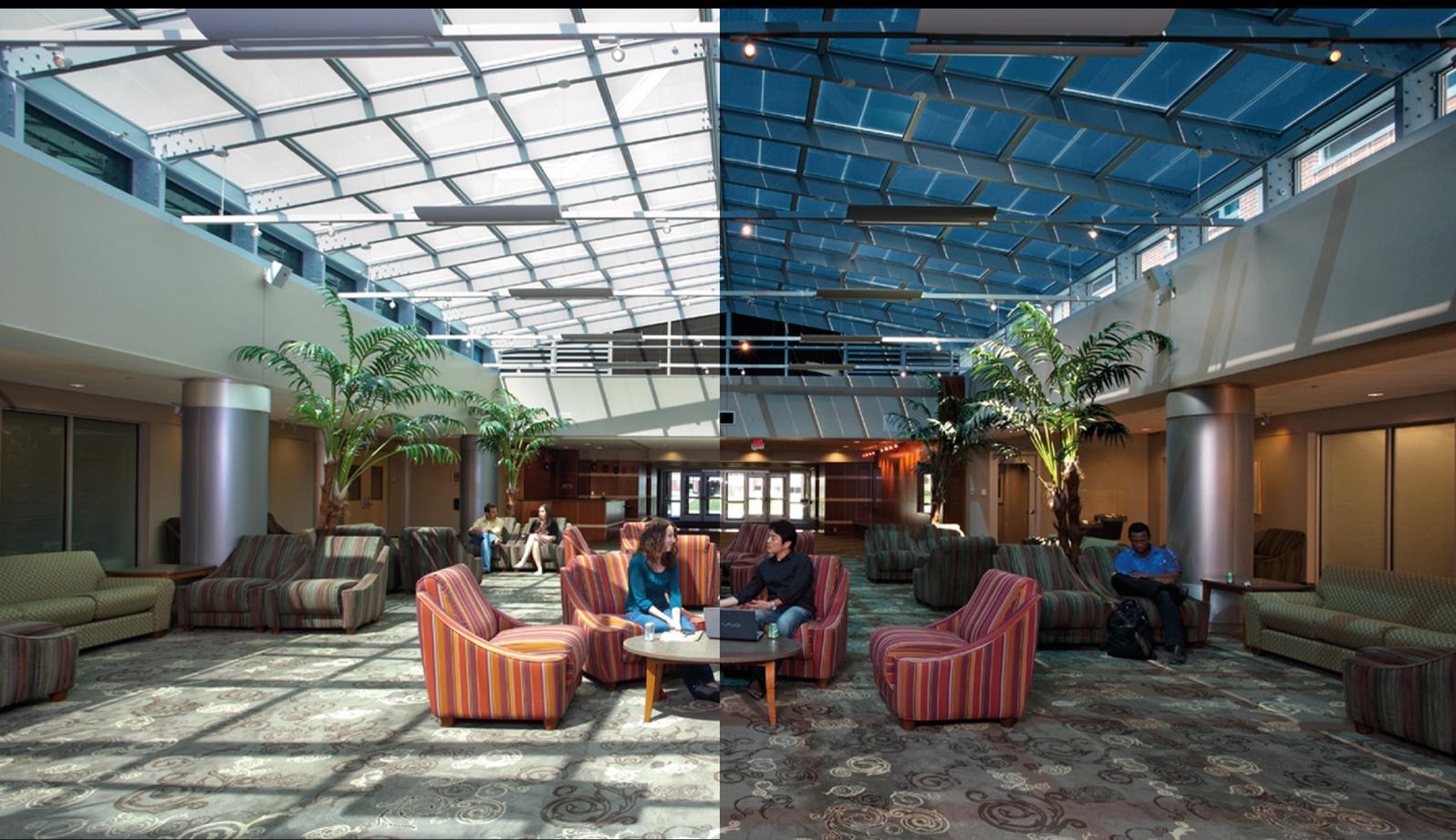
Lo switch del vetro elettrocromico non incide in modo ponderoso sui flussi registrati; inversamente a quanto sarebbe stato immediato ipotizzare con la variazione di colore diminuisce il flusso sia attraverso il vetro doppio che attraverso il vetro a lastra singola. Tuttavia tale fenomeno è probabilmente dovuto alla variazione delle condizioni climatiche, come si può notare confrontando i grafici con vetro EC alla massima trasparenza in stagioni differenti.



## CAPITOLO 3

### ANALISI DELLA LETTERATURA

Parte essenziale del lavoro di ricerca è stata l'analisi dello stato dell'arte nel campo delle strategie di controllo. Diverse università ed enti di ricerca hanno portato avanti lo studio in tale direzione, esaminando diverse modalità di switch e fissando come input diversi parametri energetici, visivi e temporali. In particolare come dati di input si considerano: irradianza esterna verticale e orizzontale; illuminamento esterno ed interno verticale e orizzontale; carico di riscaldamento e di raffreddamento; temperatura; occupazione; intervallo temporale; luminanza; indici di abbagliamento come DGP e DGI; sistemi complessi quali fuzzy system (algoritmo costruito su base sperimentale osservando il comportamento degli occupanti).



### 3.1 INDICI DI VALUTAZIONE

In questa sezione vengono introdotte le grandezze e gli indici su cui si basano le analisi condotte negli articoli scientifici riportati sinteticamente. Tali parametri visivi ed energetici sono sia stati utilizzati come input per il cambiamento di colore del vetro elettrocromico, sia come grandezza utile a quantificare l'efficienza di una strategia su diversi obiettivi. Segue una breve spiegazione del significato delle principali grandezze analizzate in letteratura.

#### GRANDEZZE FOTOMETRICHE

**Illuminamento:** rapporto tra il flusso luminoso ricevuto da una superficie e l'area della stessa.

**Luminanza:** rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente in una direzione assegnata e l'area apparente della superficie emittente vista dalla direzione assegnata. Valuta la quantità di luce percepita su una superficie da un osservatore posto in un dato punto.

#### CONSUMO ENERGETICO

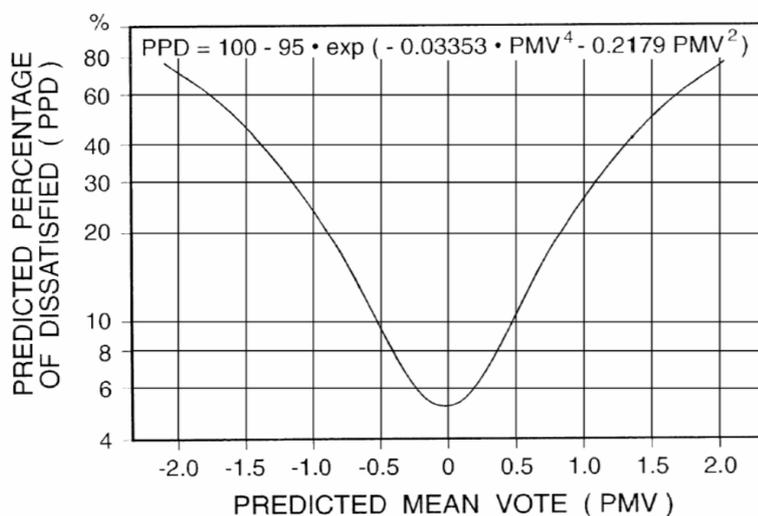
**Energia primaria:** al fine di poter indagare con un unico indice tutti i diversi tipi di dispendio energetico derivanti da fonti di diversa natura è stato introdotto il concetto di energia primaria, definibile come il potenziale energetico di una risorsa non rinnovabile allo stato naturale. In edilizia i consumi energetici sono di norma derivanti da fonti elettriche e dal gas; è possibile convertirli in energia primaria moltiplicando i risultati ottenuti per i relativi fattori energetici ( $F_e$  gas = 1.00;  $F_e$  elettricità = 2.18, valori da Decreto Legislativo 192/2005)

**Risparmio energetico** (*energy savings*): differenza, di norma suddivisa per risorsa naturale considerata, fra i consumi energetici di un caso di riferimento e il caso considerato.

#### COMFORT TERMICO

**PMV** (*Predicted Mean Vote*): indice che permette di dare una valutazione del comfort termico di un occupante, l'intervallo di comfort si posiziona quando il valore di PMV è compreso tra -0.5 e +0.5. Un valore pari a 0 indica una situazione neutrale.

**PPD** (*Predicted Percentage of Dissatisfied*): elaborato dal PMV identifica la percentuale di utenti soddisfatti o insoddisfatti dal punto di vista del thermal comfort. È stato ricavato empiricamente e si legge su grafico in relazione ai valori di PMV<sup>78</sup>.



<sup>78</sup> Predicting Thermal Comfort, Thermal Comfort, consultato su <http://ceae.colorado.edu/>

## COMFORT VISIVO

**UDI** (*Useful Daylight Illuminance*): questo indice valuta l'illuminazione naturale di un certo punto dello spazio. Riporta la percentuale delle ore in cui un determinato punto dello spazio si trova in tre intervalli di illuminamento: minore di 100 lux, tra 100 e 2000 lux, maggiore di 2000 lux<sup>79</sup>.

Lungo il tempo sono stati sperimentati diversi metodi di valutazione del grado di abbagliamento, che risulta essere un fenomeno molto complesso a causa del suo legame a una molteplicità di fattori quali i coefficienti di riflessione dei componenti esaminati, la luminanza della sorgente, l'altitudine solare e la posizione dell'osservatore nell'ambiente. Il grado di abbagliamento può essere di diverse intensità a partire da un abbagliamento relativo (quando si ha una riduzione parziale della prestazione visiva) fino alla condizione di abbagliamento assoluto (visione solo dell'oggetto abbagliante). Un osservatore può percepire una condizione di abbagliamento secondo due modalità:

- Abbagliamento diretto: quando la sorgente luminosa si trova nel campo visivo dell'osservatore la troppo elevata luminanza compromette la prestazione visiva.
- Abbagliamento per contrasto: la prossimità di superfici caratterizzate da gradi di luminanza molto diversi (di norma quando la luminanza di una superficie risulta 6 volte superiore all'altra) impedisce la percezione chiara e corretta di forme e colori, poiché l'occhio adatterà la percezione alla luminanza di una delle due superfici.

Per tali motivi gli indici che valutano l'abbagliamento considerano di norma sia la luminanza delle superfici che quella della sorgente stessa.

Gli indici utilizzati per la valutazione del comfort visivo risultano essere i seguenti:

**DGI** (*Daylight Glare Index*): nasce da uno studio condotto alla Cornwell University (USA) come modifica del BGI (*British Glare Index*), valuta il grado di abbagliamento considerando sia la luminanza della sorgente (fonte di abbagliamento diretto) sia la luminanza di fondo (abbagliamento per contrasto). Esso è espresso dalla seguente equazione

$$GI = 10 \log_{10} 0.48 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1.6} \Omega_s^{0.8}}{L_b + 0.07 \omega_s^{0.5} L_s}$$

Dove  $L_s$  è la luminanza della sorgente,  $L_b$  è la luminanza di fondo,  $\omega_s$  è l'angolo solido sotteso alla sorgente luminosa e  $\Omega_s$  è l'angolo solido sotteso alla sorgente luminosa modificato dalla posizione della sorgente<sup>80</sup>.

Il valore del DGI è espresso secondo una scala che va da 16 (appena percepibile) a 28 (intollerabile). Il passaggio tra la situazione di comfort a quella di discomfort avviene superata la soglia  $DGI = 22$ .

Questo indice è stato identificato mediante analisi condotte con sorgenti di luce artificiali.

<sup>79</sup> *Useful Daylight Illuminance*, Daylighting Pattern Guide, consultato su <https://patternguide.advancedbuildings.net/>

<sup>80</sup> Jan Wienold, Jens Christoffersen, *Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras*, in "Energy and Buildings", vol 38, 2006, pagg 744–745

**DGP** (*Daylight Glare Probability*): nato dallo studio sperimentale su ambiente d'ufficio con luce naturale

Esso è e 
$$\text{DGP} = 5.87 \times 10^{-5} E_v + 9.18 \times 10^{-2} \log \left( 1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} P_i^2} \right)$$

Dove  $E_v$  è l'illuminamento verticale e  $P_i$  è l'indice di posizione.

Come si può notare rispetto alla precedente equazione per la valutazione dell'abbagliamento per contrasto non viene considerata la luminanza di fondo, ma l'illuminamento verticale, che risulta fortemente correlato al valore di  $L_b$  ed empiricamente maggiormente appropriato per la valutazione del discomfort per contrasto<sup>81</sup>.

Il DGP varia tra 0 e 1 e viene suddiviso in 4 classi:  $\text{DGP} < 0.35$  (non percepibile),  $0.35 < \text{DGP} < 0.4$  (percepibile);  $0.4 < \text{DGP} < 0.45$  (disturbante);  $\text{DGP} > 0.45$  (intollerabile). Il passaggio tra la situazione di comfort a quella di discomfort avviene superata la soglia  $\text{DGP} = 0.4$ .

**OCCUPANCY:** orario di occupazione dell'ambiente considerato (ambiente non vuoto).

---

<sup>81</sup> J. Wienold, J. Christoffersen, *supra*, nota 80, pagg 754-755

### 3.2 ARTICOLI SCIENTIFICI

Al fine di acquisire una più completa possibile conoscenza dello stato di fatto nella ricerca sulle strategie di controllo di vetri elettrocromici e sistemi di oscuramento dinamici con veneziane, sono stati selezionati ed analizzati diversi articoli scientifici pubblicati su riviste che si interessano dell'energia dell'edificio. La ricerca e la selezione è stata operata consultando le risorse elettroniche della Biblioteca del Politecnico di Torino. Sono stati selezionati gli articoli che indagano il comportamento energetico e a livello di comfort visivo di vetri cromogenici e sistemi con veneziane, controllati mediante irradianza, illuminamento, minimizzazione dei carichi termici, indici visivi basati su illuminazione naturale e abbagliamento, indici di comfort termico.

Viene di seguito presentato un breve riassunto dell'articolo e una tabella con i parametri di input e output esaminati dai vari studi di ricerca.

Sullivan 1994

## EFFECT OF SWITCHING CONTROL STRATEGIES ON THE ENERGY PERFORMANCE OF ELECTROCHROMIC WINDOWS

L'articolo qui presentato è uno dei primi e più accurati studi sul controllo di vetri elettrocromici. In esso l'analisi delle prestazioni di diversi tipi di vetro elettrocromico è affrontata dal punto di vista energetico, benché venga sottolineata l'importanza di considerare anche la parte visiva. Viene effettuato un confronto fra cinque tipi di strategie di controllo, basate su illuminamento, irradianza e carico di raffreddamento, e vengono comparate le prestazioni di quattro vetri elettrocromici (a lastra singola) con diversi trattamenti superficiali, un elettrocromico ideale e tre vetri statici di riferimento.

I consumi dei vetri elettrocromici esistenti esaminati sono comparabili con quello statico chiaro riflettente: tuttavia non viene preso in considerazione l'utilizzo di oscuramenti per evitare l'abbagliamento e il conseguente aumento del dispendio dovuto all'impianto luce.

La strategia di controllo che porta ai migliori risultati risulta quella basata sull'illuminamento. Con l'utilizzo di tale strategia dal punto di vista del consumo elettrico per illuminazione si leggono differenze minime tra i vari tipi di vetro elettrocromico. Seguono le strategie basate sull'irradianza: vengono esaminate diverse soluzioni con differenti valori limite di irradianza come input per lo switch. Esse cambiano la loro efficacia in funzione della grandezza della finestra (più il WWR, *Window to Wall Ratio*, è alto, minore deve essere l'intervallo di switch). La grandezza della finestra influenza notevolmente il peso dell'impianto luce sui consumi finali: un  $WWR < 0.35$  renderà tale fattore il più influente sul consumo finale. La strategia basata sul carico di raffreddamento alza in modo netto i dispendi elettrici per illuminazione e può risultare efficace solo in edifici dove non sia necessario mantenere un illuminamento minimo di lavoro.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
1994	R. Sullivan, E.S. Lee, K. Papamichael, M. Rubin, S. Selkowitz	Lawrence Berkeley Laboratory	SimulazioneE	energetico
<b>ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO</b>		<b>ENERGY MODE</b>		
	ON (scuro)			OFF (chiaro)
	"			583 lx
<b>IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA</b>		<b>ENERGY MODE</b>		
	START	<i>linear</i>		END
	63 W/m <sup>2</sup>			189 W/m <sup>2</sup>
	63 W/m <sup>2</sup>			315 W/m <sup>2</sup>
	63 W/m <sup>2</sup>			630 W/m <sup>2</sup>
<b>CARICO DI RAFFREDDAMENTO</b>		<b>ENERGY MODE</b>		
	ON (scuro)			OFF (chiaro)
	presenza			assenza
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico Illuminazione; condizionamento e ventilazione; energia elettrica totale				
<b>REFERENCES</b>				
GRIGIO		LOW-E		CHIARO RIFLETTENTE

## Karlsson 2000

### CONTROL STRATEGIES AND ENERGY SAVING POTENTIALS FOR VARIABLE TRANSMITTANCE WINDOWS VERSUS STATIC WINDOWS

Karlsson esamina il comportamento di diversi tipi di vetri statici altamente performanti e quattro diversi tipi di Smart Windows comparando i risultati energetici (riscaldamento e raffrescamento) per ogni caso considerato. Le simulazioni sono state effettuate secondo diversi orientamenti e diverse località (Miami, Denver, Stoccolma), e sono state testate due strategie di controllo basate sulla radiazione solare incidente esternamente, con switch lineare tra due diversi valori limite per la massima trasparenza e colorazione.

I risultati ottenuti dalle analisi sulle Smart Windows esistenti sono simili a quelli delle finestre statiche valutate, ma implicano un risparmio energetico a livello di luce elettrica purtroppo non calcolato nella simulazione. Le Smart windows *fittizie* simulate invece superano come performance energetica i vetri statici, a parte su lato nord. Dal punto di vista energetico comunque il funzionamento delle Smart windows è a prescindere efficace nei climi caldi, ma non in quelli freddi.

La strategia A con valori limite più bassi è adatta a climi più freddi; la strategia B, con valori di settaggio più alti, è più adatta a climi caldi.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2000	J. Karlsson, B. Karlsson, A. Roos	Uppsala University	SimulazioneE	energetico
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	<b>ENERGY MODE</b>			
	<b>START</b>	<i>lineare</i>		<b>END</b>
	50 W/m <sup>2</sup> 200 W/m <sup>2</sup>			300 W/m <sup>2</sup> 400 W/m <sup>2</sup>
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
<b>Consumo energetico</b>	Risparmio energetico sul riscaldamento e condizionamento			
<b>Comfort visivo</b>	Comparazione delle trasmittanze			
<b>REFERENCES</b>				
CHIARO	LOW-e	CONTROLLO SOLARE	SMART WINDOWS (reali e fittizie)	

## Karlsson 2001

### CONTROL SYSTEM AND ENERGY SAVING POTENTIAL FOR SWITCHABLE WINDOWS

Lo studio di Karlsson si concentra sulla comparazione del funzionamento e delle potenzialità di risparmio energetico di una Smart Window rispetto ai vetri statici più performanti, in modo da valutare l'efficacia di tale tecnologia.

Vengono esaminati i comportamenti in diversi luoghi e con diversi orientamenti con un controllo basato sulla radiazione solare incidente e un controllo "intelligente", che associa al controllo della finestra un algoritmo che considera la temperatura ambientale interna e la presenza di occupanti all'interno dell'ambiente. Viene suggerito come provvedimento futuro di basare il controllo della finestra sull'illuminazione interna.

I risultati dello studio mostrano come l'utilizzo del sistema intelligente migliori efficacemente le prestazioni sia dei vetri statici che delle Smart Windows. Inoltre l'utilizzo di una Smart Window compete con i vetri statici con migliori prestazioni e produce, a seconda del clima, risparmi energetici che vanno tra lo 0 e i 150 kWh/m<sup>2</sup> yr.

In generale le prestazioni di un vetro elettrocromico dipendono dal luogo, dal tipo di edificio, dall'orientamento e dai livelli di illuminamento e comfort settati. In particolare non è efficace utilizzare questo sistema con orientamento a nord.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2001	J. Karlsson	Uppsala University	Simulazione	Energetico
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	ENERGY MODE			
	START 50 W/m <sup>2</sup>	<i>lineare</i>		END 300 W/m <sup>2</sup>
SISTEMA INTELLIGENTE	ENERGY and COMFORT MODE			
	START 50 W/m <sup>2</sup>	<i>lineare</i>		END 300 W/m <sup>2</sup>
	Tmin	Tmax	OCCUPANCY	SWITCH
	20°C	25°C	sì	sì
18°C	27°C	no	no	
PARAMETRI DI VALUTAZIONE				
Consumo energetico Risparmio energetico sul riscaldamento e condizionamento				
REFERENCES				
CHIARO	LOW-e	CONTROLLO SOLARE	SMART WINDOWS (reali e fittizie)	

## Gugliermetti 2002

### VISUAL AND ENERGY MANAGEMENT OF ELECTROCHROMIC WINDOWS IN MEDITERRANEAN CLIMATE

Lo studio di Gugliermetti e Bisegna affronta un argomento fino ad ora trattato solo marginalmente e affianca allo studio di una strategia di controllo per vetro elettrocromico lo studio delle prestazioni dell'impianto di illuminazione artificiale. L'approccio utilizzato in questo studio è infatti dichiaratamente orientato a massimizzare l'illuminazione interna prima che al risparmio energetico.

Anche in questo caso vengono esaminate tre diverse città con diversi climi (Roma, Bolzano, Catania) e due tipi di sistemi elettrocromici (con seconda lastra chiara e con seconda lastra basso-emissiva).

Vengono esaminati i dispendi energetici per riscaldamento, raffrescamento e luce artificiale (dimmerata in tre zone) ponendo come criterio il mantenimento di 500, 300 e 100 lux sul piano di lavoro. Si procede controllando il vetro sia con una strategia ON-OFF, sia con strategie di cambiamento di colorazione lineare con diversi valori limite. Vengono riportati i valori limite per ogni orientamento e clima (qui si riportano solo i valori per l'orientamento a Sud). Vengono studiati e riportati i valori ottimali risultati sia con un approccio energetico volto alla riduzione dell'energia primaria richiesta, sia con un approccio di comfort volto a minimizzare il fenomeno di abbagliamento.

I risultati mostrano come non ci sia una grande differenza tra il dispendio energetico conseguente a una strategia on-off rispetto a una strategia lineare. Considerando invece i dispendi conseguenti a un controllo con obiettivo energetico rispetto a un obiettivo di comfort visivo, i secondi sono di poco superiori ai primi (12% lineare, 5% on-off), ma con un considerevole aumento del comfort visivo interno.

In alcuni casi si registra un risparmio energetico grazie all'uso dell'EC, in altri no, ma solo un più alto livello di comfort visivo interno. Viene sottolineato che per valutare in modo rigoroso il comfort visivo realizzabile occorrono studi pratici e non teorici.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2002	F. Gugliermetti, F. Bisegna	Università di Roma	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	ENERGY MODE			
	LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx			
	ON (scuro)		OFF (chiaro)	CITTÀ
	1000 W/m <sup>2</sup>		"	<i>Bolzano</i>
	1000 W/m <sup>2</sup>		"	
	700 W/m <sup>2</sup>		"	<i>Roma</i>
	900 W/m <sup>2</sup>		"	
	600 W/m <sup>2</sup>		"	<i>Catania</i>
	600 W/m <sup>2</sup>		"	
	START	<i>lineare</i>	END	
	400 W/m <sup>2</sup>		1200 W/m <sup>2</sup>	<i>Bolzano</i>
	1000 W/m <sup>2</sup>		1500 W/m <sup>2</sup>	
	400 W/m <sup>2</sup>		800 W/m <sup>2</sup>	<i>Roma</i>
	800 W/m <sup>2</sup>		1300 W/m <sup>2</sup>	
	200 W/m <sup>2</sup>		1000 W/m <sup>2</sup>	<i>Catania</i>
	1000 W/m <sup>2</sup>		1500 W/m <sup>2</sup>	
	LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 100 lx			
	START	<i>lineare</i>	END	
100 W/m <sup>2</sup>		400 W/m <sup>2</sup>	<i>Roma</i>	
LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx				
COMFORT MODE				
ON (scuro)		OFF (chiaro)		
400 W/m <sup>2</sup>		"	<i>Ovunque</i>	
500 W/m <sup>2</sup>		"		
START	<i>lineare</i>	END		
100 W/m <sup>2</sup>		600 W/m <sup>2</sup>		
250 W/m <sup>2</sup>		800 W/m <sup>2</sup>		
PARAMETRI DI VALUTAZIONE				
Consumo energetico	Energia primaria			
Comfort visivo	DGI			
REFERENCES				
EC1	(ec+clear)	EC4	(ec+low-e)	

Lee 2005

### **ENERGY AND VISUAL COMFORT PERFORMANCE OF ELECTROCHROMIC WINDOWS WITH OVERHANGS**

Il lavoro di Lee e Tavit, introdotto da un'interessante report dei tipi di controllo sperimentati nelle ricerche precedenti, propone un ulteriore passo nello studio delle performance energetiche e visive di vetri elettrocromici controllati, affiancando lo studio degli effetti della dimensione delle finestre considerate ( $WWR=0,3-0,6$ ) alla divisione della parte finestrata in due settori, in modo da poter controllare con strategie diverse la parte alta e quella bassa del vetro. Tale passo risulta a mio parere fondamentale, poiché la posizione del componente finestrato ne influenza il peso nei fenomeni di abbagliamento, illuminazione e risparmio energetico.

Lo studio viene condotto a livello di simulazione su due città con clima caldo e freddo, Houston e Chicago, e vengono sperimentate diverse strategie di controllo con obiettivi energetici e di comfort visivo. Interessante inoltre l'approccio inverso alla strategia di luce, dove il vetro viene portato alla massima trasparenza quando l'illuminamento orizzontale interno è minore di 583 lux.

I risultati mostrano come migliore strategia sia energetica che visiva quella che regola il vetro superiore in base all'irradianza e quello inferiore in base al comfort visivo.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2005	E.S.Lee, A.Tavil	Lawrence Berkeley National Laboratory, Istanbul Technical University	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
<b>COMFORT MODE</b>				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 538 lx</b>			
	ON (scuro)	OFF (chiaro)	ON (scuro)	OFF (chiaro)
	"	< 583 lx	"	< 583 lx
	"	< 583 lx	"	<i>sempre trasparente</i>
<b>ENERGY MODE</b>				
IRRADIANZA e ILLUMINAMENTO VERTICALI ESTERNI	START	<i>lineare</i>	END	
	63 W/m <sup>2</sup>		315 W/m <sup>2</sup>	<i>sempre trasparente</i>
	63 W/m <sup>2</sup>		315 W/m <sup>2</sup>	583 lx
	63 W/m <sup>2</sup>		315 W/m <sup>2</sup>	63-315 W/m <sup>2</sup>
	63 W/m <sup>2</sup>		95 W/m <sup>2</sup>	583 lx
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico	Energia primaria; risparmio energetico; picchi della domanda di energia elettrica			
Comfort visivo	DGI; DI			
<b>REFERENCES</b>				
CLEAR + LOW-E oscuranti:	GREEN + LOW-E SOL E > 100 W/m <sup>2</sup> DGI > 22		EC1 (vetro superiore)	EC2 (vetro inferiore)

## Assimakopoulos 2006

### COMPARING THE ENERGY PERFORMANCE OF AN ELECTROCHROMIC WINDOW UNDER VARIOUS CONTROL STRATEGIES

Il lavoro di Assimakopoulos e altri risulta molto interessante non solo per l'introduzione di strategie di controllo innovative (fuzzy control), ma soprattutto perché condotto sperimentalmente su un lungo periodo temporale e con feedback di utenti fisici. Tuttavia presenta anche un limite dovuto al modesto range di SGHC tra gli stadi estremi dell'elettrocromico (0,18-0,36), fattore che influenza pesantemente le analisi effettuate .

Vengono analizzate le seguenti strategie di controllo: massima trasparenza; massima colorazione; on-off basata su illuminamento; on-off basata su irradianza; on-off basata su intervalli temporali; fuzzy control, costruito con un algoritmo che ha registrato l'operare degli utenti in fase di sperimentazione raccogliendo informazioni sul loro comportamento.

I risultati mostrano che la migliore strategia considerando i consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento è quella basata sul fuzzy control, seguita con poco scarto da quelle basate su illuminamento e irradianza. Considerando invece il consumo energetico per illuminazione abbiamo in ordine: massima trasparenza, controllo mediante illuminamento e fuzzy control. Considerando il consumo energetico totale la migliore strategia risulta quella basata sull'illuminamento. Tuttavia gli autori, concludendo, suggeriscono che tale tecnologia non compete con i vetri statici ad alte prestazioni in commercio.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2006	M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino	Ecole National des Travaux Public de l'Etat, University of Athens	Sperimentazione e simulazione	Comfort visivo, Energetico
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro) " " PID control			OFF (chiaro) < 400 lx < 500 lx
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	ON (scuro) 350 W/m <sup>2</sup>	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 400/500 lx</b>		OFF (chiaro) "
TIME SCHEDULE	ON (scuro) 11:00-15:00 12:00-16:00	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 400/500 lx</b>		OFF (chiaro)
FUZZY CONTROL	Basato sul controllo manuale registrato nel periodo di sperimentazione			
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico	Riscaldamento; illuminazione; condizionamento e ventilazione; energia elettrica totale			
<b>REFERENCES</b>				
EC CHIARO				EC SCURO

**Kim 2008**

### **AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF THE AUTOMATED BLIND IN SUMMER**

Il seguente studio si concentra sulla valutazione dell'impatto energetico e a livello di comfort visivo e termico dell'utilizzo di Veneziane automatiche interne al componente finestra.

Di norma le veneziane sono regolate manualmente in modo da evitare che la radiazione solare colpisca direttamente l'occupante o per evitare problemi di abbagliamento. Questo implica una forte riduzione delle funzionalità del componente, poiché gli occupanti raramente settano gli stadi intermedi della veneziana, e cambiano l'inclinazione delle lamelle solo quando viene superato il limite di comfort di uno dei parametri prima citati (illuminazione, comfort termico, abbagliamento).

Viene qui studiata l'efficacia di un algoritmo di controllo che si pone come obiettivo la riduzione dei fenomeni di discomfort e il risparmio energetico. È stato esaminato un edificio esistente in Corea con la partecipazione di utenti fisici e la valutazione dei parametri di comfort tramite questionario.

I risultati mostrano come a livello di comfort termico (valutato tramite PMV), di comfort energetico (Energy savings), di abbagliamento, o in più di uno tra questi casi, l'utilizzo dell'algoritmo migliori le prestazioni del sistema statico totalmente chiuso o totalmente aperto.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2008	Ji-Hyun Kim, Young-Joon Park, Myoung-Souk Yeo, Kwang-Woo Kim	Daewoo Institute of Construction Technology; Seoul National University	Sperimentazione	Comfort visivo, Energetico
<b>ENERGY MODE</b>				
ILLUMINAMENTO VERTICALE ESTERNO	ON (serrande abbassate)		OFF (serrande alzate)	
	16 000 lx			15 000 lx
<b>COMFORT MODE</b>				
	ON (serranda)	OFF (serranda)	h	STATO
	25 000 lx	15 000 lx	9:00 - 10:30	2 (45°)
	25 000 lx	15 000 lx	10:30 - 12:00	1 (30°)
	16 000 lx	15 000 lx	12:00-13:00	3 (90°)
	25 000 lx	15 000 lx	13:00-13:45	1 (30°)
	25 000 lx	15 000 lx	13:45-18:00	2 (45°)
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Comfort termico	PMV			
Comfort visivo	Illuminamento orizzontale; questionario			
Consumo energetico	Condizionamento; illuminazione; valutazione della temperatura superficiale			
<b>REFERENCES</b>				
STATICO	serrande chiuse	serrande aperte		
MANUALE	on/off condizionato	on/off non condizionato		

Jonsson 2009

## **EVALUATION OF CONTROL STRATEGIES FOR DIFFERENT SMART WINDOW COMBINATIONS USING COMPUTER SIMULATIONS**

La seguente ricerca si è focalizzata sul confronto delle prestazioni di diverse tipologie di sistemi vetrati elettrocromici, verificando il loro comportamento quando accoppiati a lastre chiare, basso-emissive e a controllo solare. Vengono proposte inoltre, accanto alle strategie tradizionali, alcune strategie di controllo innovative, che introducono la radiazione diretta come parametro di settaggio, e che settano l'utilizzo di una strategia energetica o di comfort in base al tempo di occupazione.

Aspetto interessante dell'approccio di Jonsson e Roos è il fatto di basare la strategia di controllo regolata dall'irradianza sui valori di Radiazione solare diretta trasmessa all'interno. La considerazione di tale parametro dimostra una intelligente attenzione agli aspetti di comfort visivo, poiché l'abbagliamento risulta maggiormente disturbante quando i raggi solari sono perpendicolari alle superfici trasparenti.

Anche in questo caso vengono considerate tre città con diversi climi (Miami, Denver, Stoccolma).

I risultati mostrano come dal punto di vista energetico il sistema con solar control sia ottimale per i climi caldi, e come il sistema con low-e sia ottimale per i climi freddi. Tuttavia non vengono considerati i dispendi dovuti all'impianto di illuminazione, nè viene quantificato con parametri il livello di comfort visivo ottenuto. Inoltre uno studio più accurato della strategia basata sull'irradianza potrebbe modificare notevolmente i risultati energetici ottenuti.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2009	Andreas Jonsson, Arne Roos	Uppsala University	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
CARICO DI RAFFREDDAMENTO	ENERGY MODE			
	ON (scuro) presenza			OFF (chiaro) assenza
IRRADIANZA VERTICALE DIRETTA INTERNA	COMFORT MODE			
	ON (scuro)			OFF (chiaro) $I_d < 200 \text{ W/m}^2$
IRRADIANZA e CARICO DI RAFFREDDAMENTO	ENERGY and COMFORT MODE			
	COMFORT MODE	7:00-18:00	ENERGY MODE	altri orari
	COMFORT MODE	0,5*(7:00-18:00)	ENERGY MODE	altri orari
PARAMETRI DI VALUTAZIONE				
Consumo energetico Bilancio energetico; condizionamento; riscaldamento				
REFERENCES				
CHIARO	LOW-E ossido	LOW-E argento	CONTROLLO SOLARE	

## AN EXPLORATORY ENERGY ANALYSIS OF ELECTROCHROMIC WINDOWS IN SMALL AND MEDIUM OFFICE BUILDINGS – SIMULATED RESULTS USING ENERGYPLUS

Lavoro molto interessante, presenta l'analisi di diverse strategie di controllo e la comparazione tra finestra tradizionale, finestra elettrocromica controllata e non e oscuramenti interni (interior blinds, veneziane). Un'analisi così approfondita permette di valutare con maggiore accuratezza l'effettiva efficacia dell'utilizzo di una finestra elettrocromica rispetto ai sistemi di oscuramento tradizionali. Vengono simulati tre tipi di vetro elettrocromico con diversi valori di fattore solare e trasmissione visibile e due tipi di ufficio (piccolo e medio). Le strategie di controllo si basano su ON OFF e vengono effettuate su 5 città con climi diversi (Chicago, Baltimore, Atlanta, Houston, Las Vegas).

Viene comparato il comportamento di vetri tradizionali con prestazioni simili all'elettrocromico allo stadio di massima trasparenza con quello dei vetri elettrocromici; entrambi vengono oscurati mediante l'utilizzo delle veneziane con l'obiettivo di controllare l'abbagliamento o per mantenere un certo livello di illuminamento interno.

L'analisi ha innanzitutto identificato la necessità di considerare la dimensione dell'ufficio e delle finestre per la scelta del sistema vetrato e della strategia di controllo preferibile.

Nel caso di un **ufficio piccolo** infatti il sistema vetrato più performante risulta essere quello con alta trasmissione e alto fattore solare, benché i valori di consumo energetico risultino per molte strategie che prevedono l'utilizzo dell'elettrocromico pari o di poco inferiori o superiori a quelle che prevedono l'utilizzo degli oscuranti. A livello energetico dunque la scelta di un vetro elettrocromico non risulta conveniente, tranne in alcuni casi come Baltimora, Houston, Las Vegas.

Occorre fare alcune specificazioni riguardo a tali analisi: non solo non viene mai considerato il livello di benessere, non quantificabile, dato dalla visione dell'ambiente esterno che l'elettrocromico permette, ma il confronto risulta veritiero solo nel caso in cui la chiusura e apertura degli oscuranti sia automatizzata. Infatti il controllo da parte dell'utente di tale tecnologia risulta influenzare in maniera negativa la prestazione energetica e visiva dei sistemi trasparenti. Infine usare differenti strategie di controllo per inverno ed estate modificherebbe in modo positivo i risultati.

Nel caso di un **ufficio di dimensioni medie** si nota come la reference di base porti a dei risultati molto simili a quelli dell'ufficio di ridotte dimensioni. Tuttavia l'utilizzo del vetro elettrocromico apporta invece in tutti i casi un ampio miglioramento rispetto alle altre tecnologie, portando a un risparmio energetico che varia dal 3 al 6%.

Si può concludere che il risparmio energetico dovuto all'utilizzo di un vetro elettrocromico dipenda molto dall'indice WWR, dal clima e dal tipo di strategia di controllo utilizzata. In generale se gli uffici sono di dimensioni ridotte è conveniente utilizzare un vetro elettrocromico con alto fattore solare sia nei climi freddi che in quelli caldi. Per gli uffici di medie dimensioni invece è conveniente utilizzare un elettrocromico con basso fattore solare. In totale il risparmio energetico per gli uffici di entrambe le dimensioni derivante dall'utilizzo di una strategia di controllo del vetro elettrocromico varia tra il 2 e il 7%.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2010	David B. Belzer	Pacific Northwest National Laboratory	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
DGI- CONTROLLO DELL'ABBAGLIAMENTO	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx</b>			
	ON (scuro) DGI > 20			OFF (chiaro) assenza
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro)			OFF (chiaro) < 500 lx
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
DGI E ILLUMINAMENTO	ON (scuro) DGI > 20			OFF (chiaro) < 500 lx
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico	Energia totale			
<b>REFERENCES</b>				
EC TRASP	no blinds		EC TRASP	blinds se I > 100 W/m <sup>2</sup>
EC TRASP	blinds se cooling need e I > 100 W/m <sup>3</sup>		EC TRASP	no blinds (lights 500 lx)
EC TRASP	blinds se cooling need e I > 100 W/m <sup>3</sup> (lights 500 lx)		EC TRASP	blinds se DGI > 20
EC TRASP	always blinds (lights 500 lx)			

## END USER IMPACTS OF AUTOMATED ELECTROCHROMIC WINDOWS IN A PILOT RETROFIT APPLICATION

Vengono innanzitutto sottolineati i grossi limiti delle analisi simulate condotte allo stato attuale sulle tecnologie elettrocromiche, come quello di non considerare il comportamento degli occupanti, fattore di influenza fondamentale sulle prestazioni energetiche e visive del sistema trasparente. Dunque gli autori presentano una ricerca sperimentale effettuata su una sala conferenze a Washington D.C. esposta a Est dove agli occupanti viene permesso di operare manualmente sullo stato del vetro, che vira dallo stato completamente colorato a quello completamente trasparente. La ricerca viene condotta su un periodo di 15 mesi. Per mantenere le proprietà del rivestimento elettrocromico dopo 10 giorni di colorazione del vetro esso viene virato sul trasparente per 14 ore. Sono state montate anche delle veneziane interne. I sensori registrano lo stato del vetro e verificano l'eventuale incoerenza con lo stato previsto dalla strategia automatizzata. Per valutare il comfort visivo fornito dallo stato del sistema si è preso in considerazione l'operato degli utenti, che si presume cambino lo stato del sistema se insoddisfatti dalle condizioni interne. Più precisamente sono stati considerati sia i casi in cui il vetro è stato settato a uno stato diverso da quello in cui si trovava, sia quelli in cui venivano abbassate le veneziane per controllare la luce o l'abbagliamento.

Esaminando i risultati con delle valutazioni strettamente temporali si nota come lo switch manuale abbia modificato lo stato rispetto a quello previsto dal sistema automatizzato con una media del 3-6% delle ore di occupazione (a seconda del pannello), con una deviazione standard del 9 o 17%. Esaminando i 43 casi in cui questo è accaduto, si nota come in molti casi l'utente anticipasse di poco lo stato in programma o già in cambiamento. È interessante notare che probabilmente spesso gli utenti modificano il settaggio del vetro, anche se già in stato di cambiamento, per assicurarsi che il vetro stia switchando o a causa del troppo lungo tempo necessario alla variazione.

Esaminando l'utilizzo delle veneziane si nota come esse siano state utilizzate in particolare nel periodo tra Dicembre e Aprile, ma mai in modo tale da coprire totalmente la finestra sottostante. Questo può indicare la disponibilità degli utenti a sopportare una situazione di discomfort pur di mantenere la visione dell'ambiente esterno.

Alla sperimentazione è stato affiancato l'utilizzo di Energy Plus per simulare il comportamento dell'ambiente con la finestra esistente prima della sostituzione. Dalle simulazioni esaminando le temperature superficiali interne si legge come nelle giornate fredde il vetro elettrocromico risulti più caldo dai 12 ai 17 gradi rispetto al vetro originale. Nelle giornate calde invece il vetro Ec trasparente risulta di poco più caldo, mentre l'EC scuro di poco più freddo.

Per validare le misure ottenute dal software sono stati installati dei sensori di misura sui vetri esistenti: soprattutto nel caso di giornate calde e soleggiate i dati sperimentali di temperatura superficiale interna risultano molto inferiori a quelli simulati, forse per la differenza delle condizioni climatiche di input.

Il controllo più efficace risulta quello che regola la finestra superiore per ottimizzare l'entrata

della luce naturale e quella inferiore per minimizzare l'abbagliamento.

Il risparmio energetico annuale da simulazione risulta tra il 39 e il 48%

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2011	E.S. Lee, E.S. Claybaugh, M. LaFrance	Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S. Department of Energy	Sperimentazione	Comfort visivo, Energetico
<b>LIVELLO DI LUCE</b>		<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>		
<b>ESTERNA</b>		<b>ON (scuro)</b>		<b>OFF (chiaro)</b>
<b>VERTICALE (da sensore commerciale)</b>	pannelli superiori	3000 cd		2700 cd
	pannelli inferiori	1800 cd		1600 cd
		<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>		
<b>IRRADIANZA</b>		<b>LIGHT CONTROL: illuminamento massimo 377 lx</b>		
<b>ESTERNA</b>		<b>ON (scuro)</b>		<b>OFF (chiaro)</b>
<b>VERTICALE</b>	pannelli superiori	223 W/m <sup>2</sup>		
	pannelli inferiori	91 W/m <sup>2</sup>		
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
<b>Consumo energetico:</b>	Risparmio energetico; picco di domanda elettrica			
<b>Comfort termico:</b>	PPD; Temperatura superficiale interna			
<b>Comfort visivo:</b>	Illuminamento verticale; settaggio allo stato scuro e utilizzo della veneziana			
<b>REFERENCES</b>				
<b>FINESTRA ESISTENTE</b>				

Jestico\_2013

### **PERFORMANCE ASSESSMENT OF SAGEGLASS® ELECTRONICALLY TINTABLE GLAZINGS**

In questo articolo l'autore esplora in modo generale le prestazioni di due sistemi vetrati con elettrocromico (doppio e triplo) e altri sistemi dotati di oscuranti esterni (veneziane) controllati manualmente. L'analisi è condotta a livello di simulazione su un edificio ad uffici in quattro città con climi diversi: Londra, Francoforte, Madrid, Copenhagen

Il vetro elettrocromico viene regolato tramite un algoritmo che a seconda della presenza del sole diretto implementa una strategia basata sul controllo dell'abbagliamento o piuttosto una basata sulla massimizzazione della luce naturale. Il glare-control presenta una caratteristica decisamente interessante: la facciata investigata è divisa su tre livelli. A seconda dell'altezza del sole sull'orizzonte vengono oscurati due di questi tre livelli, mantenendo chiaro l'ultimo.

I risultati mostrano che l'utilizzo del vetro elettrocromico conviene rispetto alle soluzioni con oscuranti esterni. Rimane un margine di dubbio sull'effettiva risoluzione del glare con il solo utilizzo del vetro elettrocromico. Inoltre viene sottolineato che il costo del vetro elettrocromico risulta vicino a quello di un vetro statico considerando anche il montaggio degli oscuranti interni ed esterni per evitare abbagliamento e problemi di comfort termico. Una facciata ventilata risulta invece più costosa di tale tecnologia.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2013	Dan Jestic	SAGE Electrochromics, Inc.	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
<b>COMFORT MODE - GLARE</b>				
<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 400 lx</b>				
<i>Con cielo sereno e sole diretto in facciata</i>				
ALTITUDINE SOLARE	a	Pannello superiore	medio	inferiore
	0-18°			x
	18-36°		x	x
	36-54°	x	x	x
	54-72°	x	x	
	72-90°	x		
<b>COMFORT MODE - DAYLIGHT</b>				
<i>Con cielo coperto o in assenza di sole diretto in facciata, periodo di <b>non riscaldamento</b></i>				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro)	Pannello superiore	medio	inferiore
	$E_{or} > 1000$ lx	$T_v = 40\%$	$T_v = 40\%$	$T_v = 40\%$
	ricalcolo: se $E_{or} > 1000$ lx	$T_v = 20\%$	$T_v = 20\%$	$T_v = 20\%$
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico: energia totale; emissioni di CO <sub>2</sub> ; costo dei servizi; costi dovuti al condizionatore				
picchi della domanda di energia per condizionamento; area interna netta disponibile				
Comfort termico: PMV; PPD				
<b>REFERENCES</b>				
DGU40				FACCIATA VENTILATA
DGU60 (external blinds)		TGU53 (external blinds)		DGU17 (external blinds)

Yun\_2014

## **THE INFLUENCE OF SHADING CONTROL STRATEGIES ON THE VISUAL COMFORT AND ENERGY DEMAND OF OFFICE BUILDINGS**

Yun et Al. presentano una metodologia per la valutazione delle prestazioni visive ed energetiche delle performance di involucri adattivi attraverso la simulazione con i software Energy Plus e DIVA-for-Rhino.

Per la parte simulativa vengono indagate le prestazioni di un sistema finestra- veneziane (interne?) controllato mediante l'illuminamento verticale interno ad altezza dell'occhio umano. Il sistema oscurante varia l'angolo di inclinazione quando viene raggiunto il limite di 3 000 lx sull'occhio.

Vengono comparati i dati estratti dal modello digitale con quelli osservati sperimentalmente e viene documentata la similarità dei dati di illuminamento, e dunque la validazione del modello rispetto al riferimento reale. Viene anche comparato il risultato presentato da camera LDR versus camera HDR, dove quest'ultima sovrastima l'illuminamento interno registrato. Gli autori si pongono come obiettivo l'identificazione dei limiti di Ev, illuminamento verticale, che causano abbagliamento, mediante lo studio dell'indice DGPs. Il limite per un  $DGP < 0,4$  viene identificato con 3 000 lx.

Dai risultati si evince innanzitutto come l'utilizzo della dimmerazione per l'impianto luminoso incida in modo decisivo sul consumo energetico annuale. Dal punto di vista visivo l'utilizzo delle veneziane fino a 30° di inclinazione permette di eliminare totalmente i fenomeni di abbagliamento.

Dal punto di vista energetico la soluzione preferibile risulta quella in cui le veneziane sono posizionate a 0°, tuttavia essa porta ovi problemi di abbagliamento; dunque per l'esposizione Sud viene identificata come migliore la soluzione di una strategia dinamica con la dimmerazione delle luci in periodo estivo e la soluzione con veneziane fisse a 15 ° in periodo invernale. In assenza di dimmerazione è preferibile scegliere la soluzione in cui le veneziane sono fisse a 30°.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2014	Gyeong Yun, Kap Chun Yoon, Kang Soo Kim	Korea University	Simulazione e sperimentazione	Comfort visivo, Energetico
<b>COMFORT MODE</b>				
ILLUMINAMENTO VERTICALE INTERNO	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx</b>			
	BASE ( <i>no blinds</i> )	STATO 1 (0°) 3000 lx	STATO 2 (15°) 3000 lx	STATO 3 (30°) 3000 lx
<b>COMFORT MODE</b>				
ILLUMINAMENTO VERTICALE ESTERNO	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx</b>			
	BASE ( <i>no blinds</i> )	STATO 1 (0°) 10 000 lx	STATO 2 (15°) 20 000 lx	STATO 3 (30°) 40 000 lx
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico	Energia totale annuale			
Comfort visivo	DGP; illuminamento verticale			
<b>REFERENCES</b>				
NO BLINDS	BLINDS 0°		BLINDS 15°	BLINDS 30°

Loonen\_2014

## **SIMULATION-BASED SUPPORT FOR PRODUCT DEVELOPMENT OF INNOVATIVE BUILDING ENVELOPE COMPONENTS**

Essenzialmente questa pubblicazione cerca di restituire una gerarchia tra gli elementi che influiscono sulle performance di un sistema vetrato elettrocromico. Viene presentato anche uno studio iniziale concentrato sull'applicazione di diverse strategie di controllo e sulla comparazione con il comportamento di sistemi statici dotati di oscuranti interni ed esterni; esso però si ferma a identificare la strategia che permette in generale un miglioramento rispetto ai casi base, quella basata sull'illuminamento interno orizzontale. Successivamente viene presentata un'analisi di sensitività volta a quantificare l'influenza dell'orientamento e del WWR nelle prestazioni del sistema trasparente al variare della trasparenza ma mantenendo un simile rapporto luce/apporto solare.

Aumentando il rapporto luce/apporto solare (ovvero aumentando  $T_{vis}$  mantenendo  $T_{sol}$ ) è possibile migliorare sensibilmente i risultati energetici e visivi ottenuti.

I risultati mostrano due ipotetiche strade per il miglioramento delle prestazioni delle finestre elettrocromiche: la prima consiste nell'aumentare il più possibile l'intervallo di switch del vetro EC; la seconda, forse più delicata, ma più efficace, consiste nello studiare appositamente caso per caso i parametri migliorativi su cui influire (in alcuni casi è preferibile un'alta trasmissione visibile allo stato trasparente, in altri una bassa trasmissione solare allo stato scuro).

In generale è necessario agire sulla selettività spettrale dell'elemento finestra.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2014	R.C.G.M. Loonen, S. Singaravel, M. Trčka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen	Eindhoven University of Technology	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
<b>ILLUMINAMENTO</b>				
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro) 500 lx			OFF (chiaro) "
<b>ILLUMINAMENTO</b>				
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
VERTICALE ESTERNO	ON (scuro) 20 000 lx			OFF (chiaro) "
<b>TEMPERATURA</b>				
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
INTERNA	ON (scuro) 24° C			OFF (chiaro) "
<b>TEMPERATURA</b>				
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
ESTERNA	ON (scuro) 24° C			OFF (chiaro) "
<b>TIME SCHEDULE</b>				
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
	ON (scuro) 1/05 - 30/09			OFF (chiaro) 1/10 - 31/04
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico Risparmio energetico				
Comfort visivo: Luminanza; illuminamento; DGP; UDI				
<b>REFERENCES</b>				
DGU + overhang			DGU + venetian blinds	

Loonen\_2015

### **SMART WINDOWS WITH DYNAMIC SPECTRAL SELECTIVITY: A SCOPING STUDY**

Iniziando da una generale considerazione sulle possibilità di risparmio energetico dovute al controllo della radiazione infrarossa non visibile (NIR), quantificabile tra il 3 e il 9%, questa pubblicazione indaga le prestazioni di tre tipi di finestra che variano le proprietà visive e termiche, quali la percentuale riflessa di NIR e la trasmissione visibile e solare, considerando diversi valori di WWR. Esse hanno la particolarità di essere attive in tre diverse parti dello spettro elettromagnetico. VLT varia nel capo visibile, NIR nella radiazione infrarossa, LONG WAVE per emissività. I risultati mostrano come NIR permettano un risparmio dell'energia dovuta all'illuminazione, aumentando però il dispendio per raffrescamento. VLT permettono il maggiore risparmio per raffrescamento.

A seconda del luogo analizzato (Stoccolma, Amsterdam, Berlino, Madrid) emerge la convenienza di una tecnologia rispetto alle altre; inoltre l'orientamento influenza la suddivisione dei dispendi energetici tra riscaldamento, raffrescamento e luce, e dunque anche esso è un fondamentale elemento di decisione della strategia. Dunque il progettista deve adattare la scelta della tecnologia usata basandosi strettamente sulle situazioni individuali analizzate. Comunque la tecnologia basata sul cambiamento di emissività risulta scarsa rispetto alle altre.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2015	R.C.G.M. Loonen, J.L.M. Hensen	Eindhoven University of Technology	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx</b>			
			ON (scuro)	OFF (chiaro)
	VLT		250 W/m <sup>2</sup>	"
	NIR		250 W/m <sup>2</sup>	"
<b>ENERGY and COMFORT MODE</b>				
TEMPERATURA <i>(in periodo senza riscaldamento)</i>	<b>LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx</b>			
			ON (scuro)	OFF (chiaro)
	LONGWAVE		Ti < Te	"
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>				
Consumo energetico	Energia primaria			
Comfort visivo	DGP; UDI			
<b>REFERENCES</b>				
DGU + low-e				

## OPTIMAL CONTROL AND PERFORMANCE OF PHOTOVOLTACHROMIC SWITCHABLE GLAZING FOR BUILDING INTEGRATION IN TEMPERATE CLIMATES

In questo articolo viene presentato con accuratezza lo stato attuale delle ricerche nel campo delle strategie di controllo e dell'indagine energetica degli effetti delle stesse sugli edifici. Si identifica come uno dei problemi cardine della ricerca in tale campo la mancanza di un software che permetta di effettuare analisi energetiche e visive contemporaneamente. L'obiettivo qui presentato è quello di creare un "framework" di simulazione applicabile alle analisi di involucri adattivi e alle diverse strategie di controllo ad esse applicabili mediante software già validati.

Viene presentata un'accurata descrizione dei parametri inseriti in Energy Plus per le simulazioni termiche e dell'utilizzo dei diversi strumenti di calcolo (Energy Plus + Daysim + GenOpt + Matlab) per il funzionamento delle analisi effettuate.

Le analisi si concentrano sulle prestazioni di un vetro PVC (Fotovoltacromico) in differenti climi (Sydney, Roma, Londra) quando controllato con diverse strategie. Esse si suddividono in due grandi gruppi: RBC (*Rule Based Control*), strategia che si basa su misure dello stato corrente o passato del vetro e dell'edificio, e RHC (*Receding Horizon Control*) che unisce agli input dello stato corrente una simulazione dello stato futuro da cui si ricavano i parametri per ottimizzare il settaggio del vetro nel presente. Occorre la presenza di un modello dell'edificio per poter utilizzare tali strategie.

Le strategie presentate si basano su: irradianza, controllo dell'abbagliamento, minimizzazione del fabbisogno energetico (RBC), minimizzazione dell'utilizzo di energia giornaliera e minimizzazione dello scarto tra energia utilizzata ed energia prodotta dalle celle fotovoltaiche (RHC).

I risultati mostrano che in climi dove il raffrescamento è il fattore di dispendio energetico maggiormente influente il variare della strategia di controllo utilizzata varia considerevolmente i dispendi energetici, ma non le prestazioni visive. In climi dove il riscaldamento è invece equiparabile al raffrescamento come influenza le diverse strategie risultano in assoluto meno efficaci come risparmio rispetto al caso statico in confronto ai climi caldi, ma comunque migliorano sensibilmente le prestazioni visive portando prestazioni energetiche paragonabili ai casi statici. Nei climi freddi le diverse strategie risultano poco efficaci rispetto ai casi di riferimento. Dove infatti è importante il peso del riscaldamento nei periodi invernali minimizzando il glare si aumenta il fabbisogno di riscaldamento. Le strategie predittive migliorano in tutti i casi i risultati ottenuti.

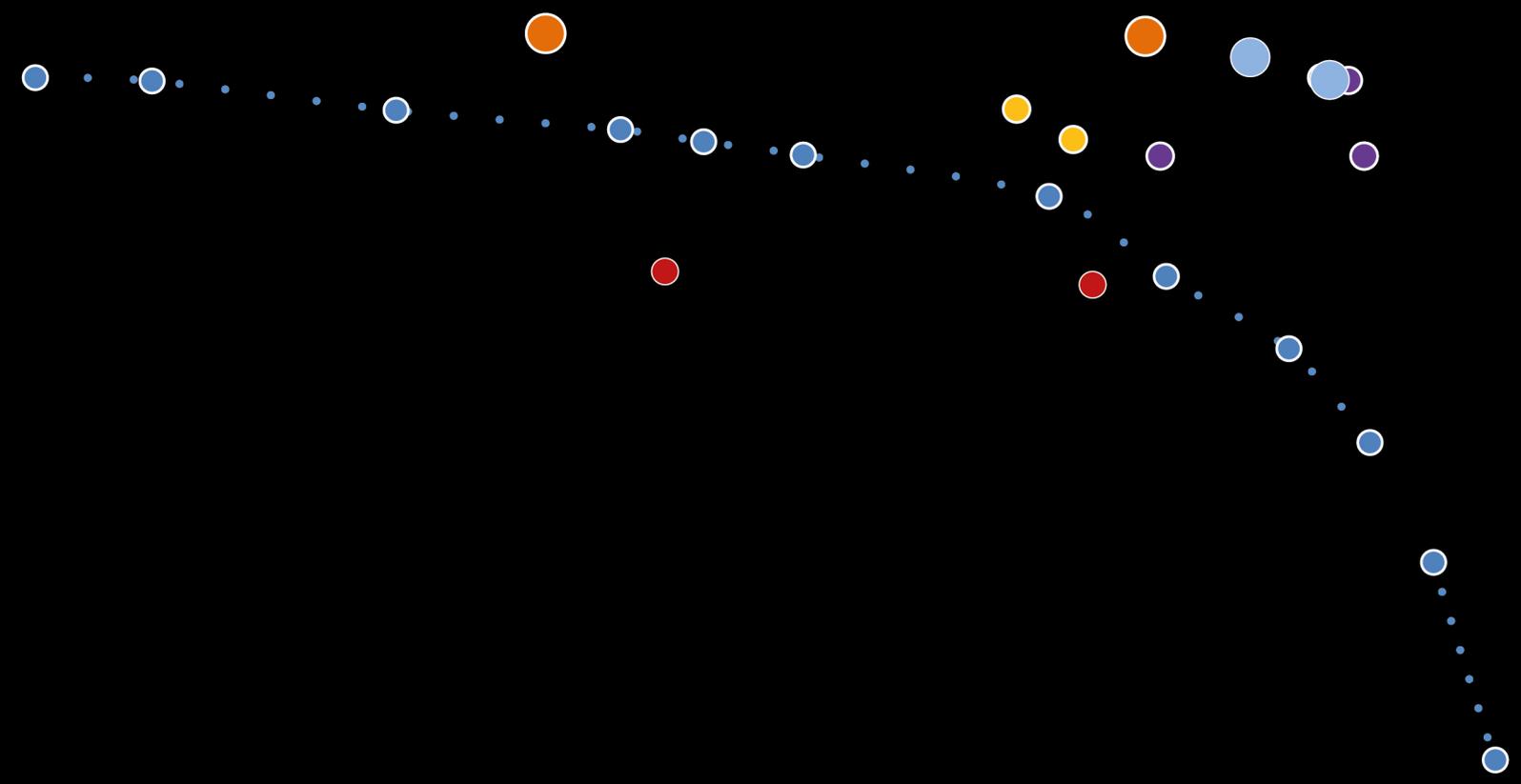
ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO	
2016	Fabio Favoino, Francesco Fiorito, Alessandro Cannavale, Gianluca Ranzi, Mauro Overend	University of Cambridge, University of New South Wales, Politecnico di Bari, Istituto di Nanotecnologia di Lecce, The University of Sydney	Simulazione	Comfort visivo, Energético	
<b>Rule Based Control (RBC)</b>					
3. IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	trasparente t = 0,5	0,2*I <sub>max</sub> t = 0,36	0,4*I <sub>max</sub> t = 0,27	0,7*I <sub>max</sub> t = 0,17	1*I <sub>max</sub> t = 0,16
<b>COMFORT MODE</b>					
4. GLARE INDEX	STATO i DGP≠A	... DGP≠A	... DGP≠A	STATO f DGP≠A	
5. FABBISOGNO ENERGETICO	<b>ENERGY MODE</b> <i>minimizzare il fabbisogno energetico (riscaldamento, condizionamento e illuminazione)</i>				
6. GLARE INDEX E FABBISOGNO ENERGETICO	STATO i DGP≠A	... DGP≠A	... DGP≠A	STATO f DGP≠A	<i>minimizzare il fabbisogno energetico (riscaldamento, condizionamento e illuminazione)</i>
<b>Receding Horizon Control (RHC)</b>					
7. ENERGY USE	<b>ENERGY and COMFORT MODE</b> <i>minimizzare l'utilizzo di energia per un giorno preciso</i> <i>ricalcolo del settaggio in base alla simulazione</i>				
8. GLARE INDEX	STATO i DGP≠A	... DGP≠A	... DGP≠A	STATO f DGP≠A	<i>minimizzare l'utilizzo di energia per un giorno preciso</i> <i>ricalcolo del settaggio in base alla simulazione</i>
9. GLARE INDEX E ENERGY USE	STATO i DGP≠A	... DGP≠A	... DGP≠A	STATO f DGP≠A	<i>minimizzare NSE (difference between site energy, SE, and PVC-G solar harvested energy, EPVC-G)</i> <i>ricalcolo del settaggio in base alla simulazione</i>
<b>PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>					
Consumo energetico	Energia totale annuale; energia netta totale annuale; profilo dei carichi energetici				
Comfort visivo	DGP; UDI				
<b>REFERENCES</b>					
PVC trasparente				PVC opaco	



## CAPITOLO 4

### SIMULAZIONE NUMERICHE

La caratterizzazione sperimentale del vetro elettrocromico risulta il punto di partenza per le analisi energetiche e visive condotte successivamente a livello di simulazione. Essa infatti ha permesso la validazione del modello grazie al confronto di parametri non dipendenti dalle dimensioni e dalle caratteristiche dell'ambiente considerato, quali i flussi termici e solari.



## Identificazione delle references e costruzione dei sistemi vetrati

Innanzitutto è stato necessario identificare i modelli di riferimento rispetto ai quali viene costruita l'analisi delle diverse strategie di controllo applicate. La prestazione energetica e visiva di un modello infatti perde di significato se non è confrontata con un riferimento che funge da paragone per le prestazioni raggiungibili con un costo decisamente inferiore. La scelta dei riferimenti è caduta su due vetri selettivi con alte prestazioni estratti dal catalogo dei prodotti AGC Glass: uno di essi risulta avere caratteristiche visivi simili allo stadio di massima trasparenza del vetro elettrocromico, l'altro massimizza il rapporto  $T_v/g$ , permettendo il passaggio di luce e mantenendo un basso fattore solare. Vengono considerati come riferimento anche i dieci diversi stadi di colorazione del vetro elettrocromico, ottenuti partendo dai dati visivi e termici registrati in laboratorio ENEA sui campioni a lastra singola.

I sistemi vetrati prima presentati esemplificano il comportamento di un qualsiasi sistema statico, che viene confrontato grazie alle simulazioni con il comportamento di un sistema dinamico, in grado di modificare in maniera considerevole la performance annuale finale.

Il primo passo nella parte di simulazione è stata la realizzazione dei modelli dei vetri da utilizzare nelle simulazioni. Essa è stata fatta parzialmente mediante l'utilizzo di Energy Plus e di Window7.

Per i vetri selettivi, poiché il catalogo AGC riporta i valori di trasmissione visibile, trasmittanza termica e fattore solare per un sistema vetrato con camera ad argon, è stato sufficiente inserire nel codice di Energy Plus i dati già a disposizione.

Ultra 60 T	$\tau_v$	$\rho_v$	$\alpha_v$	g	SC	$U_g$
6 - 16 Ar 90% - 4	62	13	35	30	0.34	1.0
Vision 72	$\tau_v$	$\rho_v$	$\alpha_v$	g	SC	$U_g$
6 - 16 Ar 90% - 4	72	13	26	38	0.44	1.0

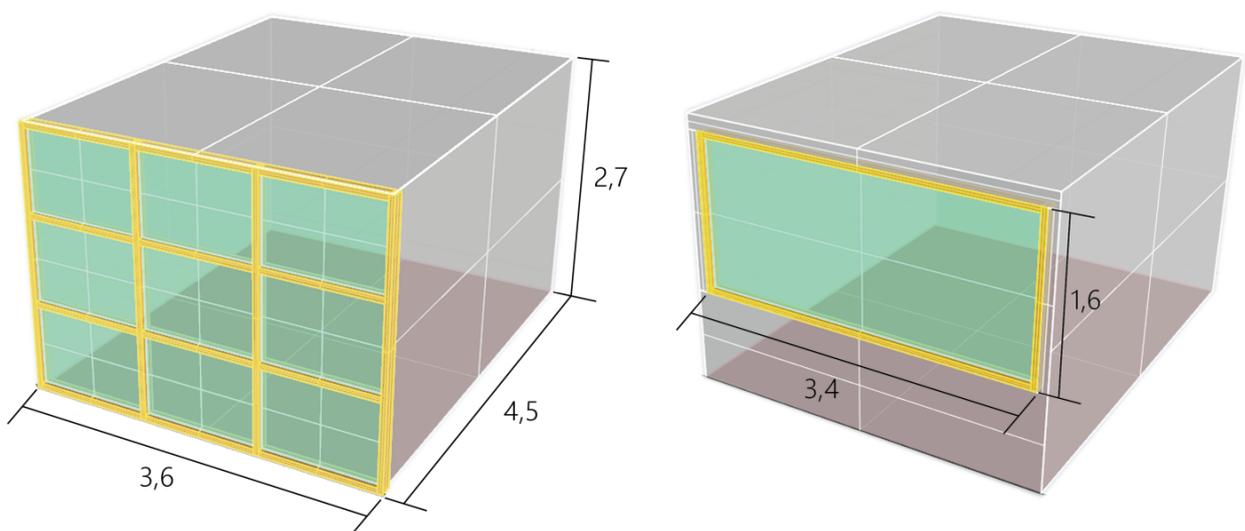
Nel caso del vetro elettrocromico invece è stato necessario il passaggio attraverso un ulteriore software, poiché, avendo a disposizione i dati per una lastra singola elettrocromica, è stato necessario identificare le proprietà di un sistema lastra elettrocromica - argon - lastra con rivestimento basso-emissivo (sistema analizzato sperimentalmente). Per ottenere i dati desiderati è stato utilizzato il software messo a disposizione gratuitamente dal Lawrence Berkeley National Laboratory, uno dei laboratori maggiormente all'avanguardia nella sperimentazione sulla tecnologia elettrocromica. Il software in questione, Window 7.6, permette di individuare le caratteristiche visive di un qualsiasi sistema vetrato progettato accoppiando centinaia di tipologie di lastre con caratteristiche estratte da cataloghi delle aziende produttrici e scegliendo il tipo di camera. possibile inserire manualmente dati propri e ottenere nuove tipologie di lastra. Grazie alle caratteristiche misurate sperimentalmente è stato possibile ottenere 10 tipi di sistema vetrato con caratteristiche corrispondenti ai 10 stadi di colorazione della lastra elettrocromica accoppiata a lastra basso-emissiva con camera ad argon intermedia.

Vetro Elettrocromico	$\tau_v$	g	SC	$U_g$	
9 - 15 Ar 90% - 5	da   a	55   8	39   7	0.45   0.08	1.2

## Costruzione dell'ufficio

Il secondo passo dell'analisi consiste nella realizzazione del modello di ufficio in cui vengono installati i sistemi vetrati. Il modello viene costruito con il software Rhinoceros, che ha la possibilità di dialogare con diversi plug-in per simulazioni energetiche e visive.

L'ufficio realizzato come modello digitale per le simulazioni è un ufficio di dimensioni standard, utilizzato per simulazioni nello stesso campo dal team di ricerca del DENERG del Politecnico di Torino. Esso ha dimensioni 3,6\*4,5\*2,7 m. È orientato secondo i punti cardinali e presenta la facciata finestrata a Sud. Sono stati realizzati due tipi di ufficio: uno con facciata Sud completamente finestrata (rapporto WWR=1) e una con facciata Sud parzialmente finestrata (rapporto WWR=0.5), anche considerando le implicazioni architettoniche ed estetiche di tale differenza di rapporto pieno-vuoto.



Si considera l'ufficio come parte di un complesso più grande, inserito tra altri ambienti e dunque in contatto con altre zone dalle stesse caratteristiche termiche. Perciò nel processo di simulazione le partizioni verticali e orizzontali, ad eccezione della facciata orientata a Sud, sono considerate superfici adiabatiche, che non scambiano energia e massa con l'ambiente esterno. Il muro che si interfaccia con l'esterno invece è realizzato secondo gli standard ASHRAE 90.1-2007, per una zona climatica in fascia 3.

Al fine di indagare il variare del comportamento dei diversi sistemi e delle diverse strategie di controllo a seconda della variazione delle condizioni climatiche esterne le simulazioni sono state condotte sul modello di ufficio standard localizzato in tre diverse città con caratteristiche climatiche differenti: Torino (clima *heating dominated*), Roma (equilibrio tra *heating* e *cooling*) e Abu Dabhi (clima *cooling dominated*).

## Identificazione delle strategie di controllo base

Prima di iniziare il processo di simulazione grazie al confronto con la letteratura e alla discussione con il team di lavoro sono state identificate le primarie strategie di controllo con cui iniziare l'analisi del comportamento dei vetri controllati in modo dinamico.

## Analisi visive

Passo successivo è stata l'analisi illuminotecnica/visiva eseguita con il Plug-in di Rhinoceros DIVA for RHINO. Tale software permette l'estrazione dei dati di DGP e illuminamento su un punto dello spazio per tutti i momenti dell'anno analizzati. Grazie a questi dati è possibile procedere con alcune valutazioni illuminotecniche, estraendo i seguenti indici:

- DA (Daylight Autonomy), ovvero la percentuale di tempo lungo un anno in cui un dato punto dello spazio riceve un'illuminazione maggiore di una certa soglia. Le soglie fissate per l'analisi sono state 300 e 500 lux, dati scelti secondo la normativa europea EN 12464-1 (giugno 2011). Sono stati analizzati gli illuminamenti su una griglia di 130 nodi distanti tra loro 0.3 m a 0.8 m di altezza (altezza del piano di lavoro).

- sDA (Spatial Daylight Autonomy), ovvero la percentuale di spazio che riceve sufficiente illuminazione per almeno il 50% delle ore annuali in cui l'ufficio risulta occupato. Le soglie fissate sono state nuovamente 300 e 500 lux sul piano di lavoro.

- UDI (Useful Daylight Illuminance), ovvero la percentuale di tempo lungo un anno in cui un dato punto dello spazio si trova in tre range di illuminazione (0-100 lux, 100-2000 lux, oltre 2000 lux).

- DGP (Daylight Glare Probability), indica il grado di abbagliamento percepito in un dato punto dello spazio. Esso viene classificato in quattro intervalli:

0-0,35: abbagliamento impercettibile

0,35-0,4: abbagliamento percettibile

0,4-0,45: abbagliamento disturbante

0,45-1: abbagliamento intollerabile

Tale parametro è stato valutato considerando la percentuale di tempo in cui un l'abbagliamento percepito a livello del punto medio del lato finestrato e a tre metri di distanza dalla facciata (su modello di altre analisi esaminate in letteratura) non risulta fastidioso, ( $DGP < 0,4$ ).

Gli indici sopra indicati sono stati estratti mediante l'elaborazione manuale su Excel dei dati estratti dalle simulazioni.

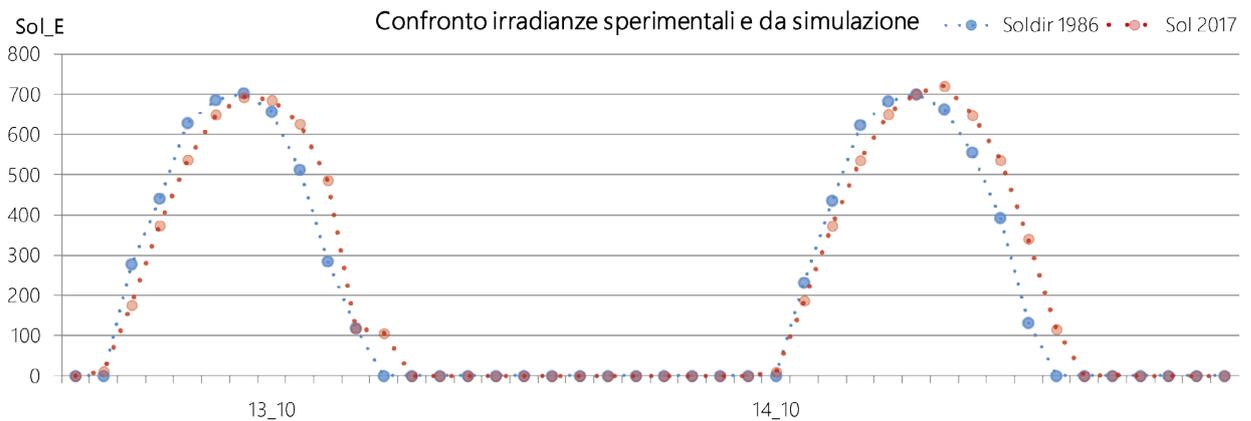
## Analisi termiche

In seguito alle simulazioni visive è stato possibile effettuare le simulazioni termiche, che sono state affrontate con i software DIVA for RHINO e Energy Plus. Lanciando una simulazione iniziale da DIVA è possibile estrarre un file IDF contenente le caratteristiche spaziali e materiche dell'ufficio analizzato; successivamente si modifica manualmente l'IDF per impostare i parametri desiderati e le diverse strategie di controllo (utilizzo su Energy Plus di EMS - *Energy Management System*). Grazie alle simulazioni termiche sono stati estratti i valori di energia primaria necessaria per riscaldamento, per raffrescamento e per illuminazione. I risultati sono riportati in kWh/m<sup>2</sup>.

Le analisi visive e termiche condotte hanno posto le basi della parziale complessificazione delle primarie strategie di controllo.

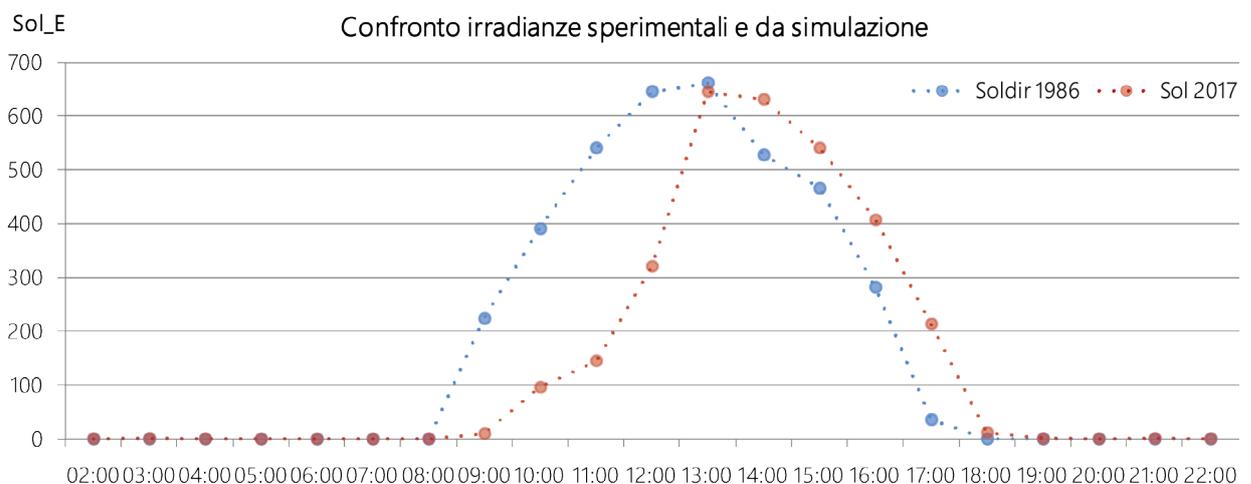
## 4.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO

La caratterizzazione sperimentale effettuata in campo ha permesso di validare dal punto di vista energetico il modello realizzato su software. La validazione visiva del modello non è stata effettuata poiché con la tipologia di apparato sperimentale TWINS utilizzato non è possibile procedere in termini di validazione a livello visivo, tuttavia il software Radiance si può assumere validato in letteratura. Per validare energeticamente il modello si è proceduto confrontando i flussi termici misurati sperimentalmente con i flussi ottenuti dalle simulazioni in momenti puntuali dell'anno. Per poter confrontare i dati è necessario identificare le giornate tipo in cui le condizioni ambientali risultino confrontabili. Nel grafico successivo si può vedere il confronto tra i valori di irradianza esterna e flussi termici da software e sperimentali selezionati per la validazione.



mese	giorno	ora	Sol <sub>dir</sub> 1986	Sol 2017	φ 1986	φ 2017
10	13	13	703	693.1	34.9	31.8
10	14	13	700	701.5	34.5	34.4

Come si può vedere i flussi registrati sperimentalmente sono assolutamente comparabili con quelli esito dei simulazione. In questo caso è stato esaminato il vetro elettrocromico a uno stadio di trasparenza intermedia ( $T_{sol} = 0.11$ ).



stato	mese	giorno	ora	Sol <sub>dir</sub> 1986	Sol 2017	φ 1986	φ 2017
1	10	31	12	646.0		27.7	
1	10	31	14		631.5		26.8

Anche con vetro settato allo stadio di completa colorazione ( $T_{\text{sol}} = 0.04$ ) i flussi risultano comparabili.

Non è stato possibile validare i flussi allo stadio di massima trasparenza a causa della scarsità e della grandissima variazione dei dati registrati in tale stato: il susseguirsi di bug quali la rottura dell'impianto di raffrescamento, il processo di graduale colorazione della lastra, le anomalie climatiche del mese di Dicembre, che hanno reso i dati ambientali raccolti estremamente diversi rispetto a quelli di partenza per la simulazione, hanno reso impossibile un confronto con condizioni simili. Ai fini dell'obiettivo del lavoro si è comunque ritenuto sufficientemente soddisfacente il risultato derivante dal processo di validazione effettuato.

## 4.2 ANALISI EFFETTUATE SU TORINO \_ WWR 1

Sono di seguito presentati i risultati visivi e termici delle analisi condotte nella città di Torino considerando l'ufficio con facciata totalmente vetrata esposta a Sud.

### 4.2.1 ANALISI SU VETRI STATICI

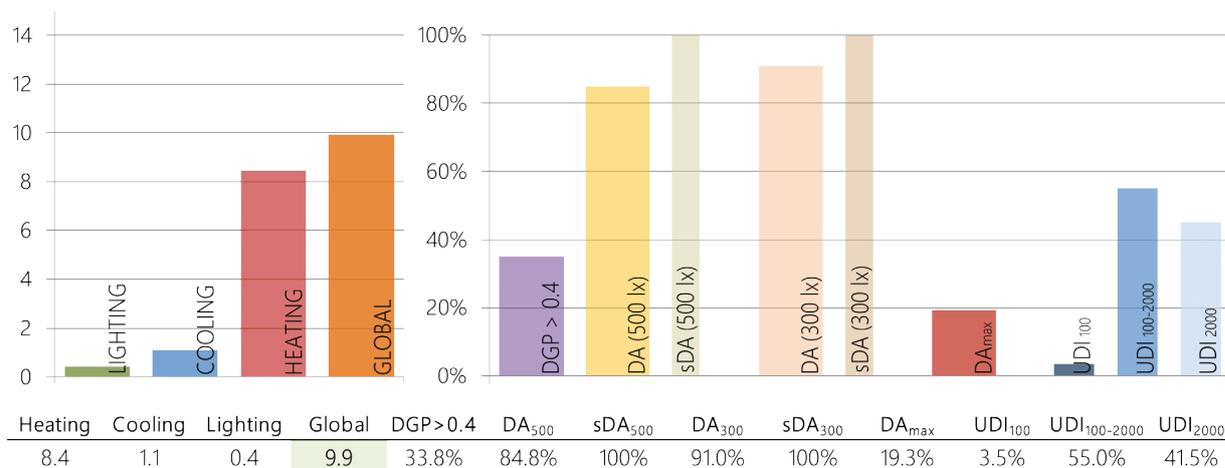
Seguono le analisi condotte a livello annuale su un ufficio con sistemi trasparenti che utilizzano come lastra esterna un vetro statico selettivo o colorato, nello specifico i diversi stadi del vetro elettrocromico. I vetri statici di riferimento sono denominati con lettera identificativa, valore di trasmittanza visibile e fattore solare.

#### U62/30

Nome	Nome da catalogo	Tipo di vetro	$\tau_v$	g	Ug
U62/30	Ultra 60 T	Vetro selettivo Stopray_ AGC	62	30	1.0

Estratto dal catalogo AGC, è un sistema caratterizzato da alta selettività e basso coefficiente di riflessione. È stato scelto perché presenta un coefficiente  $T_{vis}$  simile a quello del vetro elettrocromico alla massima trasparenza ( $T_{v-u} = 0,62 - T_{v-e} = 0,55$ ).

kWh/m<sup>2</sup>y



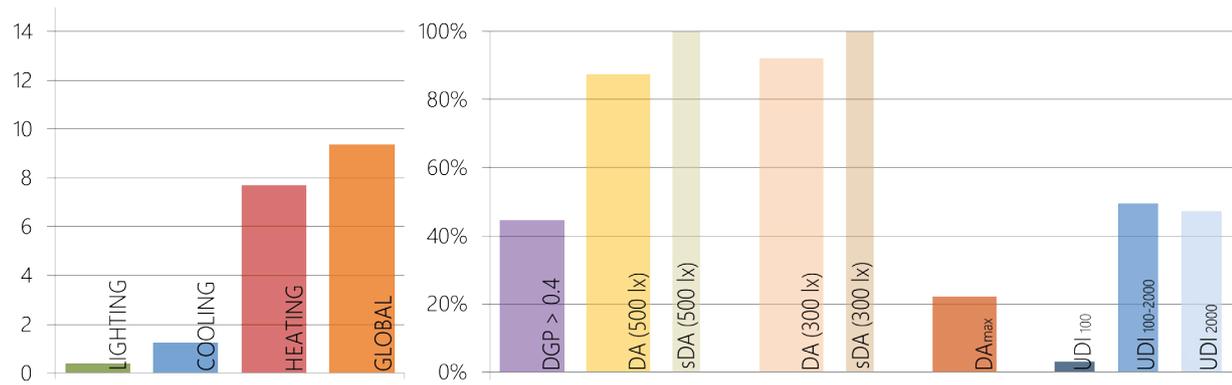
Il vetro selettivo Ultra 60 presenta ottime prestazioni per quanto riguarda gli indici di illuminamento naturale e per il consumo energetico dovuto all'illuminazione. Tuttavia la presenza di abbagliamento è piuttosto alta ( $DGP > 0,4 = 34\%$ ): questo dato, unito alla notevole  $DA_{max}$  e  $UDI_{2000}$  è indice di un scarso livello comfort visivo. Dal punto di vista energetico si comporta in modo ottimo, come sarà possibile esaminare grazie al confronto con i sistemi successivi.

#### V72/38

Nome	Nome da catalogo	Tipo di vetro	$\tau_v$	g	Ug
V72/38	Vision 72	Vetro selettivo Stopray_ AGC	72	38	1.0

Estratto dal catalogo AGC, è un sistema caratterizzato da alta selettività e ottima trasmissione visibile, mantenendo allo stesso tempo un fattore solare di valore contenuto.

kWh/m<sup>2</sup>y



Heating	Cooling	Lighting	Global	DGP>0.4	DA <sub>500</sub>	sDA <sub>500</sub>	DA <sub>300</sub>	sDA <sub>300</sub>	DA <sub>max</sub>	UDI <sub>100</sub>	UDI <sub>100-2000</sub>	UDI <sub>2000</sub>
7.7	1.3	0.4	9.4	44.7%	87.5%	100%	92.3%	100%	22.0%	3.0%	49.6%	47.4%

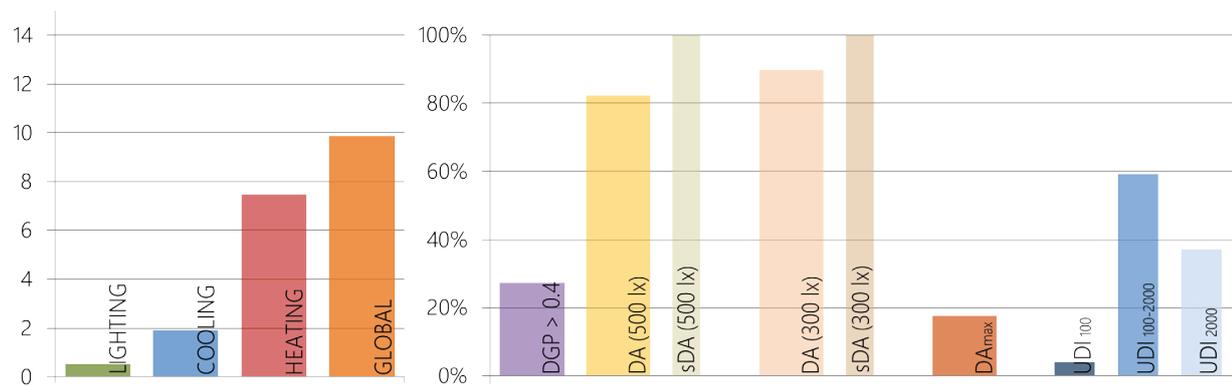
Anche il secondo vetro selettivo presenta ottime prestazioni visive, con una DA pari quasi all'88% dell'anno, con conseguente minimizzazione dei dispendi per illuminazione. Tuttavia la presenza di abbagliamento sale al 45%: in quasi metà del periodo di occupazione dell'ufficio si verifica abbagliamento. Un dato così elevato implica un'influenza sui risultati energetici, che nel caso esaminato si rivelano ottimi, e su quelli visivi, poiché considerando l'intervento manuale o automatizzato su veneziane o tende interne ed esterne tali parametri subiscono variazioni notevoli.

### EC55/39

Nome	Stadio elettrocromico	Stato di colorazione	$\tau_v$	g	U <sub>g</sub>
EC55/39	EC_stadio 10	Totale Trasparenza	55	39	1.2

Sistema caratterizzato grazie alle misure effettuate nel laboratorio ENEA - ROMA e l'elaborazione attraverso Window 7, corrisponde a una finestra con vetro elettrocromico Gesimath (utilizzato nella parte sperimentale) settato allo stadio di massima trasparenza.

kWh/m<sup>2</sup>y



Heating	Cooling	Lighting	Global	DGP>0.4	DA <sub>500</sub>	sDA <sub>500</sub>	DA <sub>300</sub>	sDA <sub>300</sub>	DA <sub>max</sub>	UDI <sub>100</sub>	UDI <sub>100-2000</sub>	UDI <sub>2000</sub>
7.4	1.9	0.5	9.8	27.2%	82.1%	100%	89.8%	100%	17.4%	3.9%	59.1%	36.9%

Il vetro elettrocromico settato allo stadio di massima trasparenza presenta buone prestazioni visive, con una DA<sub>500</sub> leggermente inferiore rispetto ai vetri selettivi, ma anche una decisamente minore presenza di abbagliamento (DGP>0,4=27%). Se si considera la DA<sub>300</sub> il risultato è simile

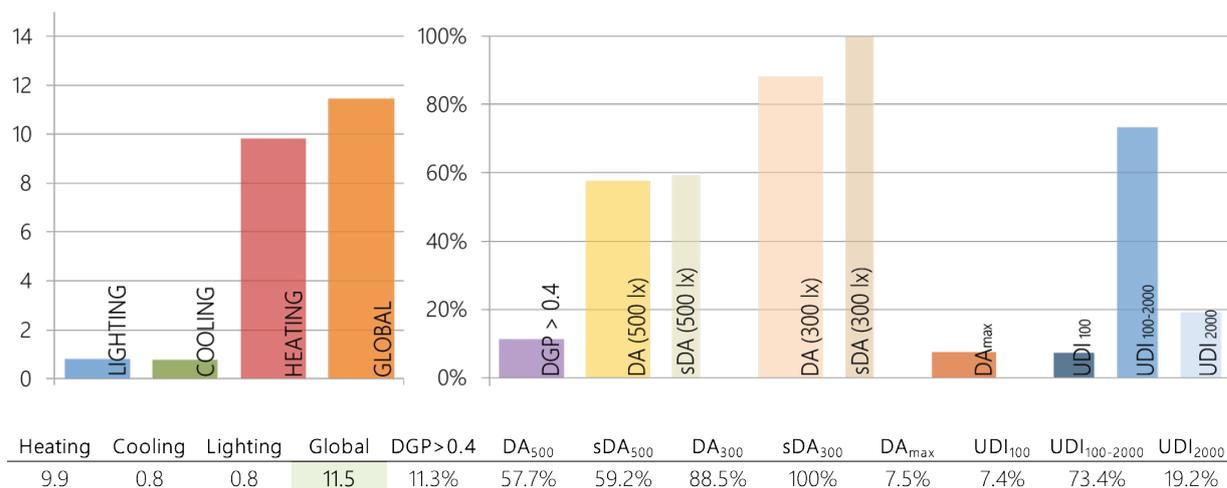
a quello dell'U62/30 (un punto percentuale di differenza). Questo fatto sottolinea l'importanza della scelta dei parametri delle valutazioni visive, scelta conseguente al compito visivo attribuito all'ambiente in progetto: essa influenza pesantemente la valutazione delle prestazioni dei sistemi cromogenici e del loro controllo. Dal punto di vista energetico il sistema risulta equiparabile all'U62/30 e lievemente peggiorativo rispetto al V72/38, presentando una minore richiesta di riscaldamento, ma una maggiore richiesta di raffrescamento e illuminazione artificiale. Essendo lo stadio limite per trasparenza presenta la prestazione massima raggiungibile come minimizzazione del fabbisogno di riscaldamento e illuminazione, e come massimizzazione dell'illuminazione naturale.

### EC28/17

Nome	Stadio elettrocromico	Stato di colorazione	$\tau_v$	g	Ug
EC28/17	EC_stadio 6	Colorazione intermedia	28	17	1.2

Finestra con vetro elettrocromico settato a uno stato di colorazione intermedia con prestazioni simili a un sistema 6-Argon 15-4 con vetro esterno colorato verde.

kWh/m<sup>2</sup>y



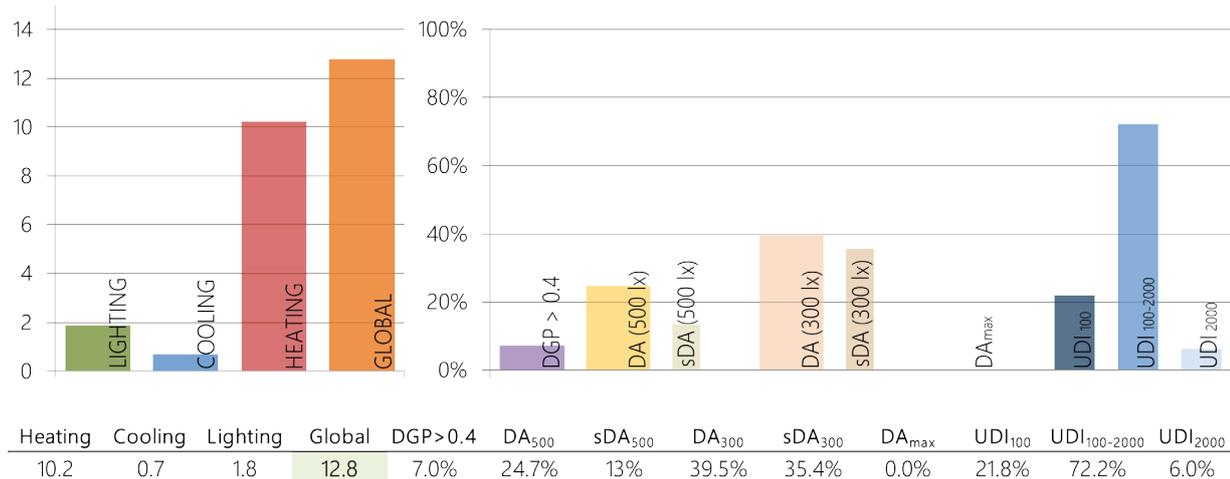
Si presenta nel dettaglio questo particolare stadio del vetro elettrocromico perché nella successiva elaborazione delle strategie di controllo risulta essere un punto nodale dei parametri analizzati. Esso ha una prestazione energetica piuttosto scarsa, ma è lo stadio tra tutti che minimizza la somma del fabbisogno energetico per raffrescamento e illuminazione mantenendo una performance discreta nella minimizzazione dell'abbagliamento.

### EC8/7

Nome	Stadio elettrocromico	Stato di colorazione	$\tau_v$	g	Ug
EC8/7	EC_stadio 1	Totale Colorazione	8	7	1.2

Finestra con vetro elettrocromico settato allo stato di massima colorazione con prestazioni simili ai sistemi con vetro esterno di colori blu/verde/grigio intenso, ma con fattore solare decisamente inferiore a tali sistemi.

kWh/m<sup>2</sup>y



L'altro stadio limite del vetro elettrocromico presenta la prestazione massima raggiungibile come minimizzazione del fabbisogno di raffrescamento e come riduzione dell'abbagliamento (DGP>0,4=7%). La prestazione energetica è molto scarsa a causa dell'aumento del fabbisogno di riscaldamento e illuminazione, e così pure gli indici di illuminazione naturale risultano molto bassi.

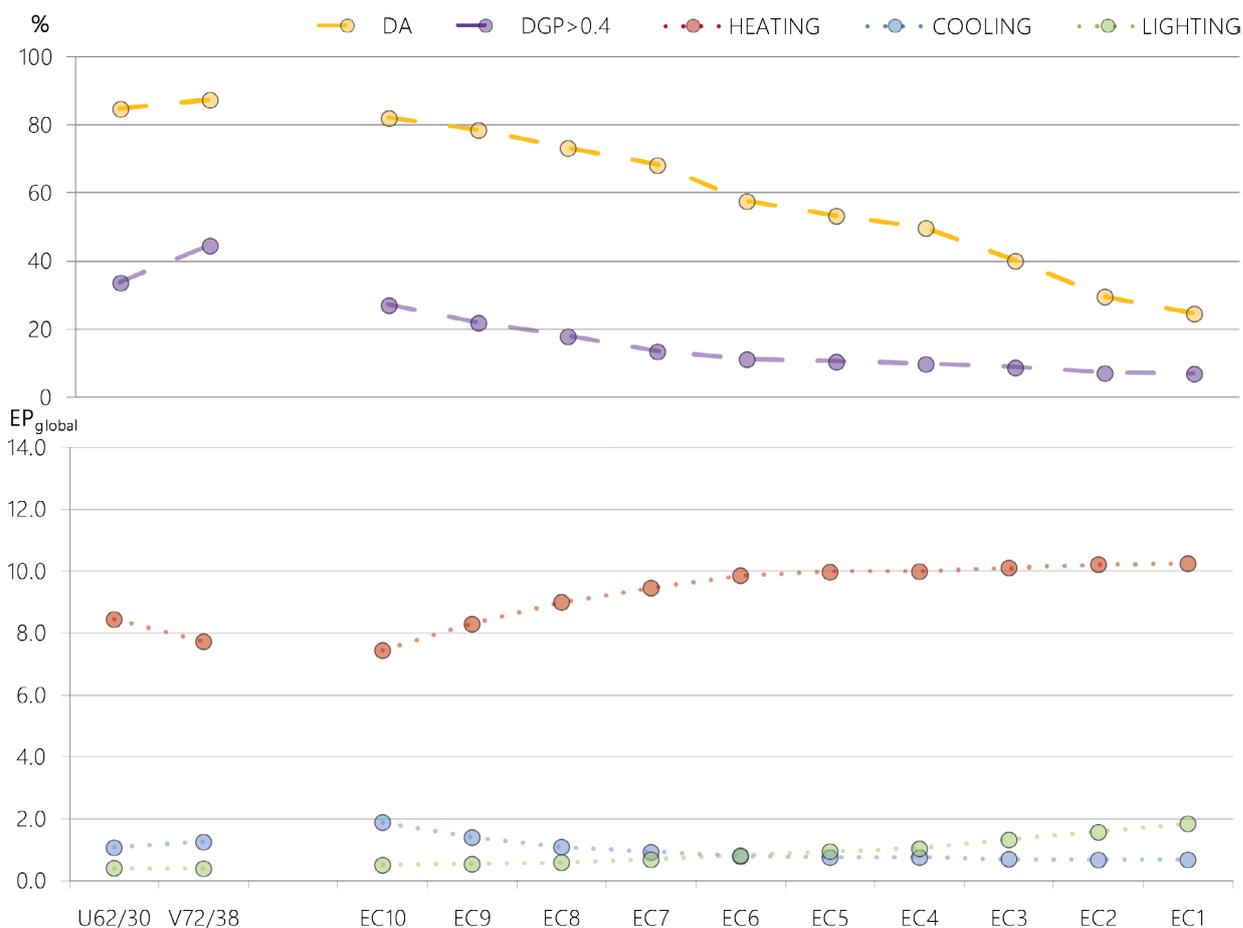
### CONFRONTO FRA I 10 STADI DI COLORAZIONE

L'analisi delle prestazioni dell'elettrocromico sui 10 stadi di colorazione permette delle riflessioni utili per la progettazione di strategie di controllo adeguate. Osservando la tabella possiamo notare come lo stadio con minore dispendio energetico per riscaldamento risulti ovviamente quello più trasparente. Per la minimizzazione del dispendio energetico preponderante nel periodo estivo invece si considera la somma del fabbisogno per raffrescamento e per illuminazione, poiché dalla tabella si evince come la minimizzazione del fabbisogno di raffrescamento non apporti una riduzione dei consumi causando l'impennata dei consumi per illuminazione.

	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
EC10	82.1%	27.2%	7.4	1.9	0.5	9.8	2.4
EC9	78.6%	22.0%	8.3	1.4	0.5	10.2	1.9
EC8	73.3%	18.0%	9.0	1.1	0.6	10.7	1.7
EC7	68.3%	13.6%	9.5	0.9	0.7	11.1	1.6
EC6	57.7%	11.3%	9.9	0.8	0.8	11.5	1.6
EC5	53.4%	10.6%	10.0	0.8	0.9	11.7	1.7
EC4	49.8%	9.9%	10.0	0.8	1.0	11.8	1.8
EC3	40.2%	8.8%	10.1	0.7	1.3	12.1	2.0
EC2	29.7%	7.2%	10.2	0.7	1.6	12.5	2.3
EC1	24.7%	7.0%	10.2	0.7	1.8	12.8	2.5

Osservando il grafico sottostante possiamo notare come il variare dei parametri non sia lineare ma tendente a stabilizzarsi superato uno stadio limite; in particolare procedendo verso colorazioni sempre più intense lo stadio 6 si presenta come soglia oltre la quale sia il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, sia la presenza di abbagliamento tendono a stabilizzarsi o

a variare in dimensione minima. L'osservazione di questo comportamento è risultata cruciale nell'ideazione della strategia ML\_6, successivamente presentata.



#### 4.3.2 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO ON/OFF

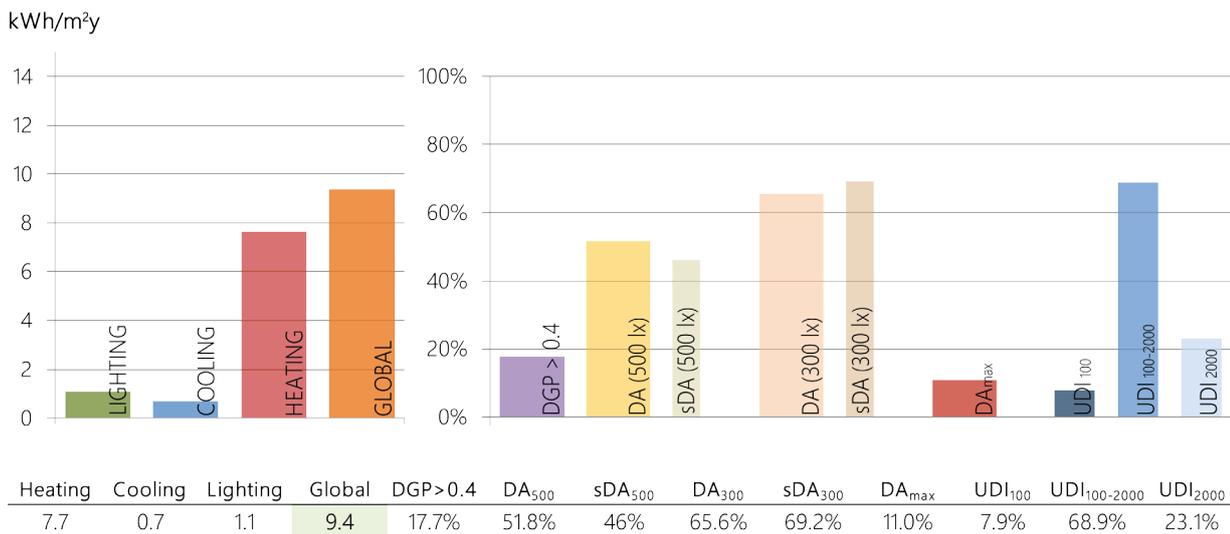
Seguono le analisi delle prestazioni derivanti dal controllo del vetro elettrocromico con strategie on/off basate su obiettivi visivi ed energetici. Esse sono denominate con lettera identificativa e stadio limite del vetro elettrocromico utilizzato.

#### ML\_1

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Obiettivo	Input
ML_1	Minimize Loads 1	10;1	Energetico	Carico di riscaldamento; Carico di raffreddamento

Il vetro è settato allo stato di massima trasparenza (stato 10) ogni qual volta è presente un carico di riscaldamento; in presenza di un carico di raffreddamento il vetro viene settato allo stato di massima colorazione (stato 1).

References: Sullivan 1994; Jonsson 2009; Favoino\_2016



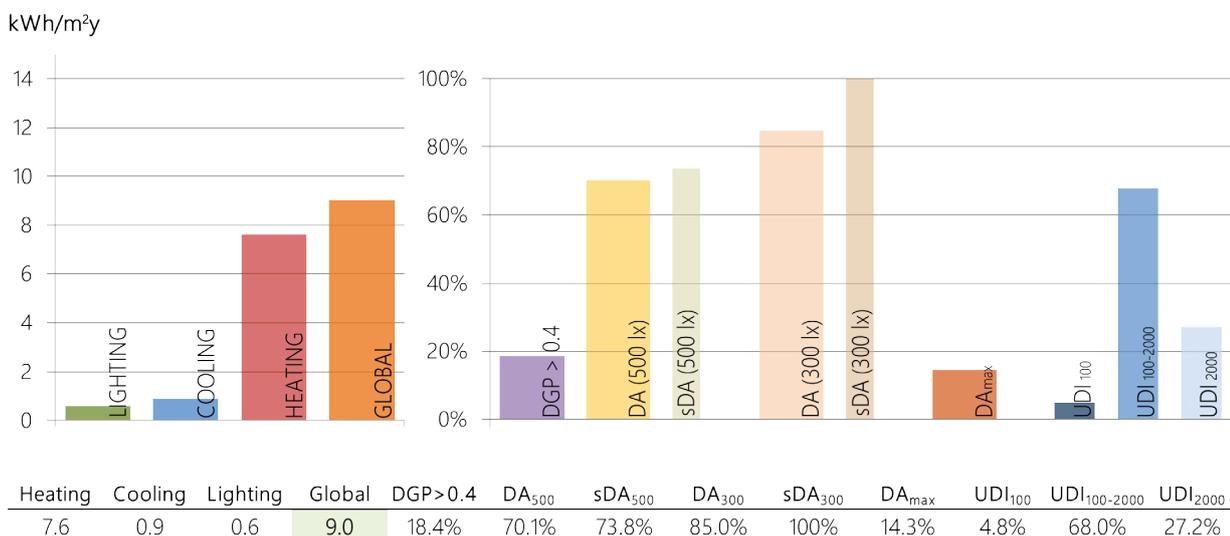
La prestazione energetica eguaglia quella del vetro selettivo V72/38 presentando allo stesso tempo un netto miglioramento dal punto di vista della riduzione dell'abbagliamento ( $DGP_{V72/38} > 0,4 = 45\%$ ;  $DGP_{ML_1} > 0,4 = 18\%$ ). Tuttavia l'illuminazione naturale annuale si riduce del 40% circa rispetto ai vetri selettivi e risulta molto scarsa.

## ML\_6

Per le osservazioni prima presentate sulla necessità di minimizzare la somma delle domande di energia per raffrescamento e illuminazione nell'ottica di minimizzare il fabbisogno energetico globale, si pone come stadio limite di colorazione lo stadio 6, stadio che minimizza tale somma.

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Obiettivo	Input
ML_6	Minimize Loads 6	10;6	Energetico	Carico di riscaldamento; Carico di raffrescamento

Il vetro elettrocromico viene settato allo stato di massima trasparenza (stato 10) ogni qual volta sia presente un carico di riscaldamento e allo stato di intermedia colorazione (stato 6) ogni qual volta sia presente un carico di raffrescamento.



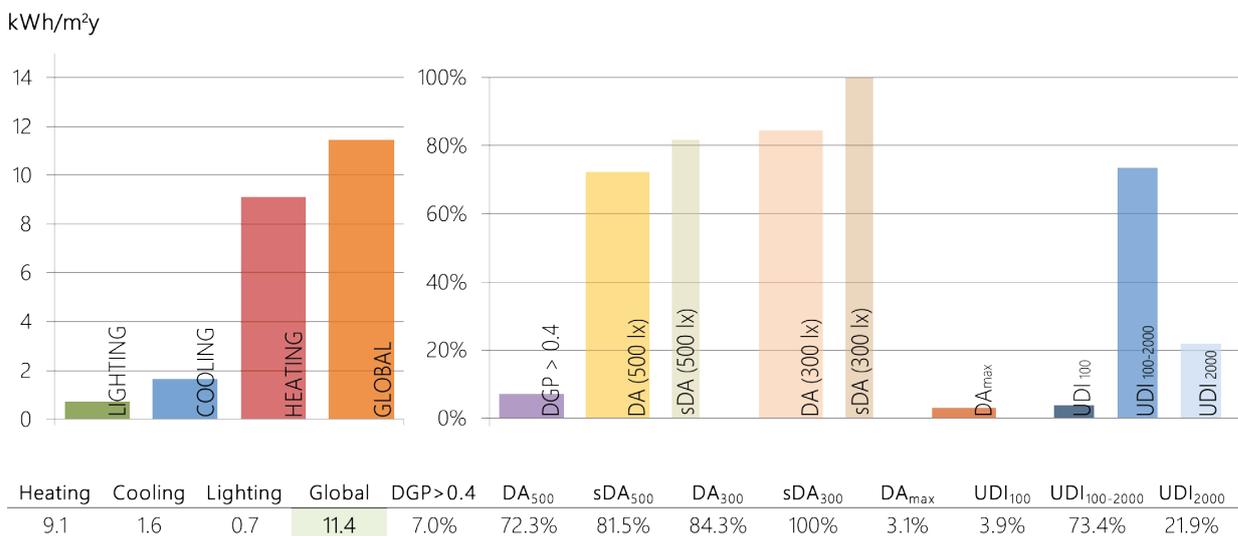
La prestazione energetica migliora la strategia di base grazie alla grande diminuzione della domanda di energia per illuminazione sacrificando in modo limitato la riduzione dell'abbagliamento ( $DGP_{ML_1} > 0,4 = 17.7\%$ ;  $DGP_{ML_6} > 0,4 = 18.4\%$ ). Si registra anche un grande miglioramento per quanto riguarda l'illuminazione naturale ( $DA_{ML_1} = 51.8\%$ ;  $DA_{ML_6} = 70.1\%$ ).

## MG\_1

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Obiettivo	Input
MG_1	Minimize glare_1	10;1	Visivo	DGP > 0.4

Questa strategia è volta a eliminare il più possibile la presenza di abbagliamento: il vetro elettrocromico viene settato allo stato di massima colorazione ogni qual volta l'indice DGP supera lo 0,4.

References: Favoino\_2016



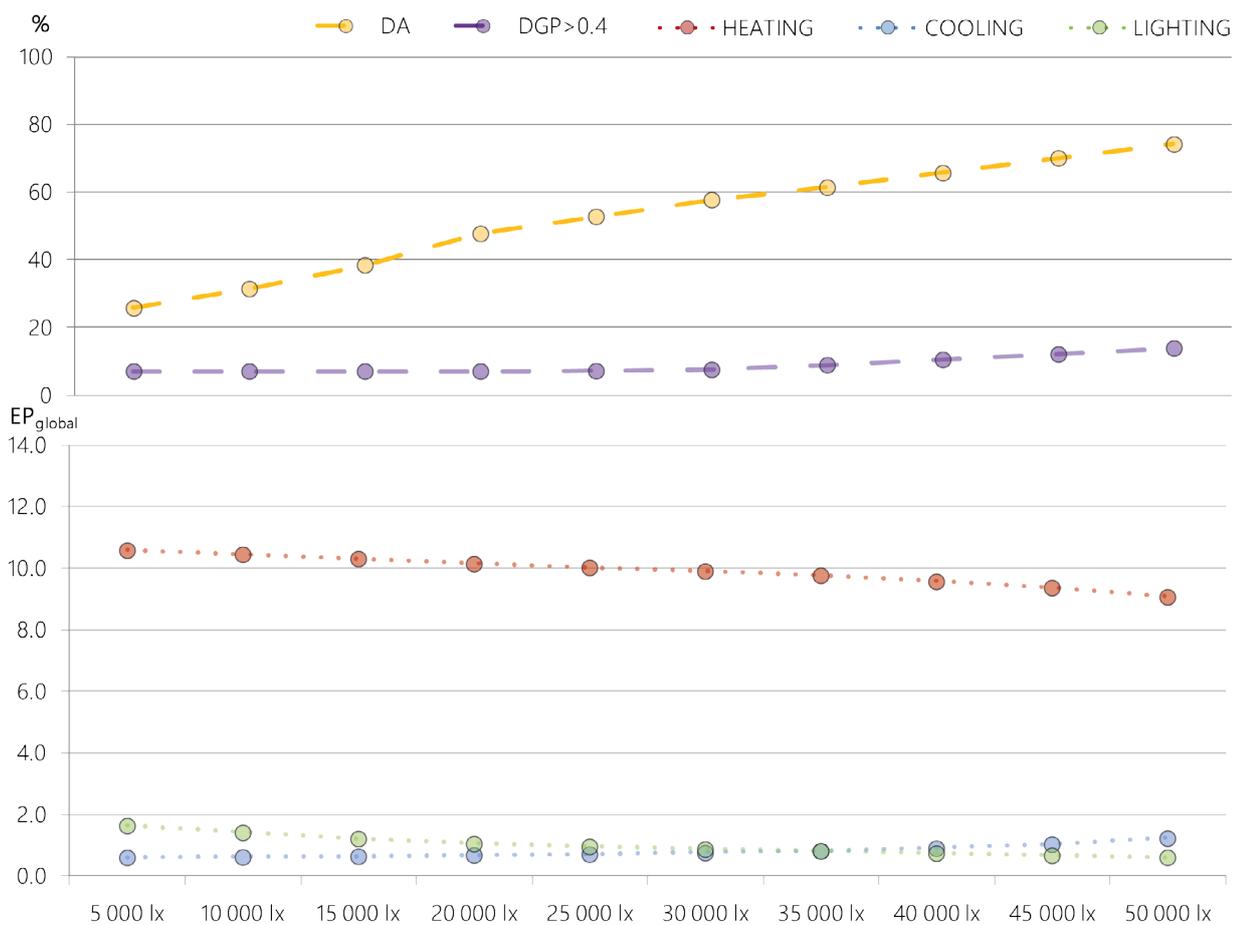
La prestazione energetica risulta abbastanza scarsa, in particolare a causa della crescita della domanda di energia per riscaldamento. Per contro dal punto visivo le prestazioni sono discrete per quanto riguarda l'illuminazione naturale, ed ottime per la riduzione dell'abbagliamento. Una strategia binaria è fortemente limitante per l'illuminazione: più avanti si indagheranno dunque strategie basate su DGP solo lineari.

## STRATEGIE ON/OFF BASATE SU ILLUMINAMENTO

In riferimento ad alcuni articoli della letteratura si è deciso di indagare varie strategie che basano lo switch su una soglia di illuminamento verticale esterno. Si è proceduto variando questa soglia di intervalli di 5 000 lux per identificare i limiti inferiore e superiore per una più complessa strategia lineare basata sull'illuminamento.

SOGLIA	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
5 000 lx	26%	7%	10.6	0.6	1.6	12.8	2.3
10 000 lx	31%	7%	10.5	0.6	1.4	12.5	2.1
15 000 lx	38%	7%	10.3	0.7	1.2	12.2	1.9
20 000 lx	48%	7%	10.2	0.7	1.1	11.9	1.8
25 000 lx	53%	7%	10.0	0.7	1.0	11.7	1.7
30 000 lx	58%	8%	9.9	0.8	0.9	11.6	1.7
35 000 lx	61%	9%	9.8	0.8	0.8	11.4	1.6
40 000 lx	66%	10%	9.6	0.9	0.8	11.2	1.7
45 000 lx	70%	12%	9.4	1.0	0.7	11.1	1.7
50 000 lx	74%	14%	9.1	1.2	0.6	10.9	1.9

In tutti i casi la riduzione dell'abbagliamento è notevole rispetto ai vetri selettivi a discapito dell'illuminazione naturale che solo negli ultimi casi raggiunge un livello discreto, ma comunque molto inferiore ai riferimenti. Si nota come la minimizzazione della domanda raffrescamento + illuminazione corrisponda al controllo con soglia a 35 000 lux. Intorno a tale valore di soglia inoltre notiamo anche che l'indice DGP>0,4, mantenutosi circa costante tra i 5 e i 30 000 lux-soglia cominci a crescere con una pendenza maggiore. Per tale motivo si decide di fissare 30 000 lux come soglia inferiore della strategia lineare.



### 4.2.3 ANALISI BASATE SU STRATEGIE CONTROLLO LINEARE

Seguono le analisi delle prestazioni derivanti dal controllo del vetro elettrocromico con strategie lineari basate su obiettivi visivi ed energetici. Esse sono denominate con lettere identificative e stadio limite di colorazione utilizzato.

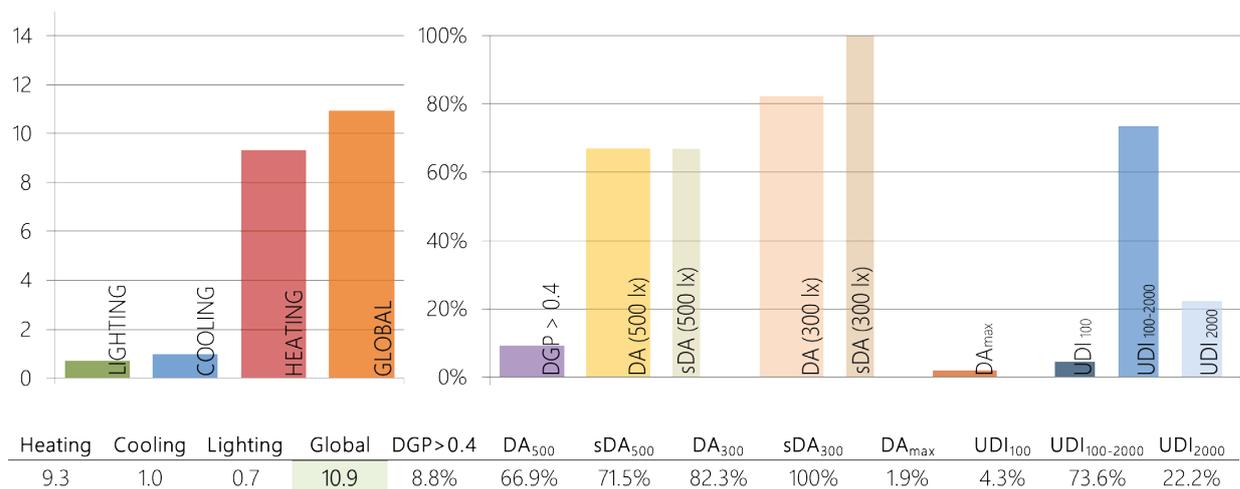
#### LX\_1

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
LX_1	Lux Threshold_1	10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 (10-1)	$E_{start}$ 30 000 lux $E_{end}$ 50 000 lux

Strategia basata sulle osservazioni raccolte dalle simulazioni On Off con soglia di illuminamento. Nell'intervallo tra 30 000 e 50 000 lux il vetro si scurisce fino alla massima colorazione con una variazione lineare (switch ogni 2500 lux).

References: Kim 2008, Yun\_2014, Loonen\_2014

kWh/m<sup>2</sup>y

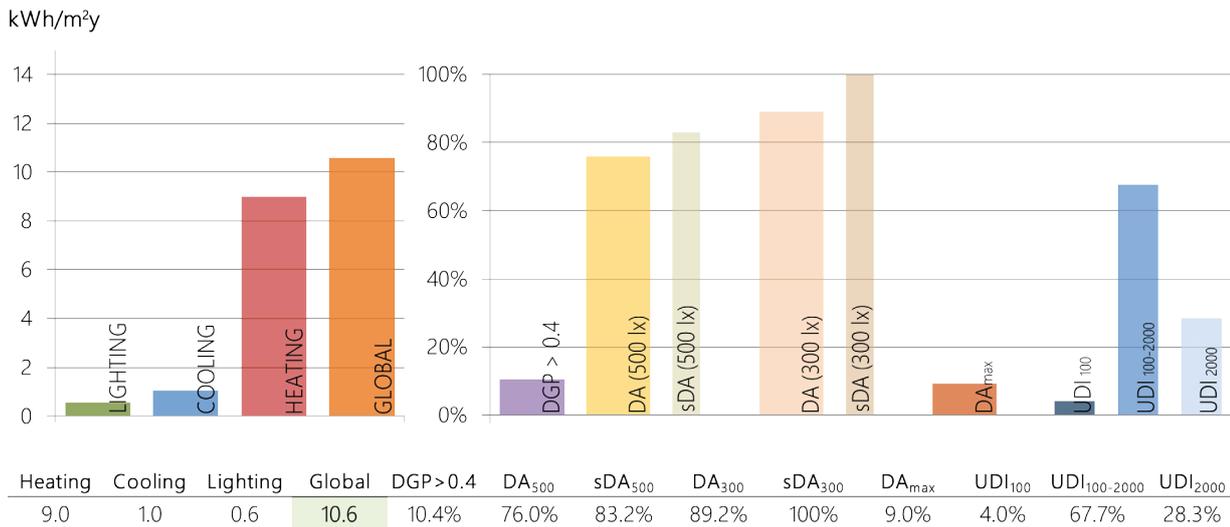


I risultati sono un compromesso tra gli obiettivi energetici e visivi: la domanda energetica finale è abbastanza alta, ma si accompagna a una buona riduzione dell'abbagliamento (non troppo distante dalla massima raggiungibile con EC) e un livello di illuminazione naturale quasi discreto. È possibile migliorare le due prestazioni in cui essa risulta carente ponendo come stadio limite di colorazione lo stadio 6.

#### LX\_6

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
LX_6	Lux Threshold_6	10, 9, 8, 7, 6 (10-6)	$E_{start}$ 30 000 lux $E_{end}$ 50 000 lux

Perfezionamento della simulazione prima presentata, nell'intervallo tra 30 000 e 50 000 lux il vetro si scurisce fino a una colorazione intermedia (stadio 6) con una variazione lineare (switch ogni 2500 lx).



Rispetto alla precedente migliorano le prestazioni energetiche e di illuminazione naturale con un lieve peggioramento sulla riduzione dell'abbagliamento ( $DGP_{LX,1} > 0,4 = 8,8\%$ ;  $DGP_{LX,6} > 0,4 = 10,4\%$ ).

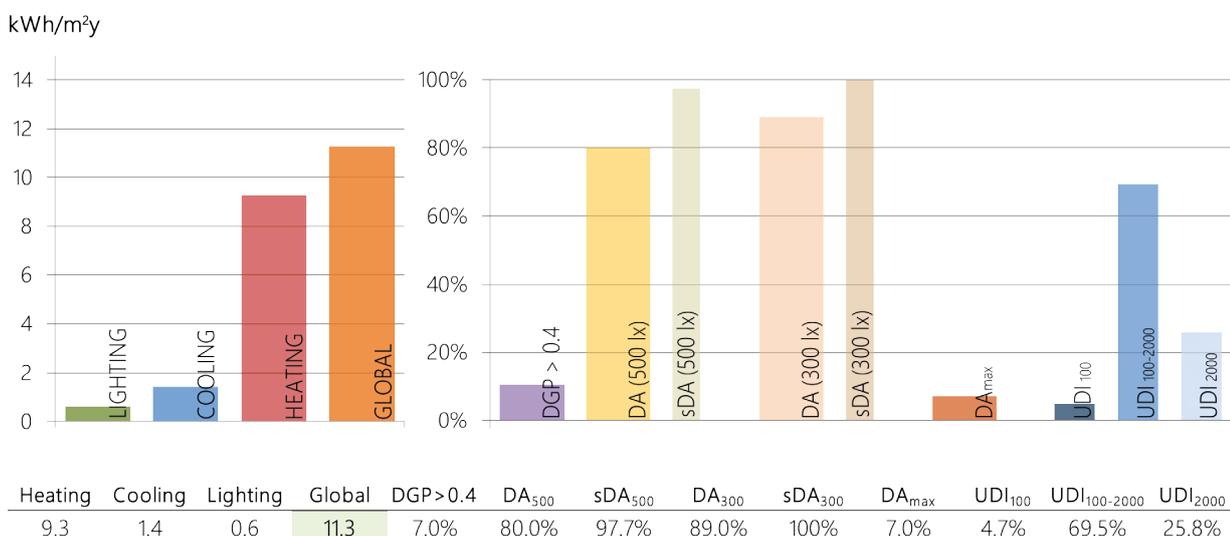
In generale nessuna delle due strategie lineari basate su illuminamento verticale esterno porta a risultati energetico-visivi soddisfacenti.

### MG\_L\_1

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
MG_L_1	Linear Minimize Glare_1	(10-1)	DGP > 0,4

Evoluzione della strategia binaria basata sull'indice DGP, tale strategia imposta linearmente lo switch del vetro elettrocromico. Ogni volta che la soglia 0,4 viene superata il vetro compie uno switch verso lo stadio appena precedente (con colorazione più intensa) a quello in cui si trova. Se tale switch non è sufficiente a far rientrare il DGP sotto la soglia, il vetro passerà allo stadio ancora più scuro, sempre step by step e mai saltando stadi intermedi.

References: Favoino 2016



Rispetto a tutte le precedenti strategie la corrente permette di ottenere le migliori prestazioni

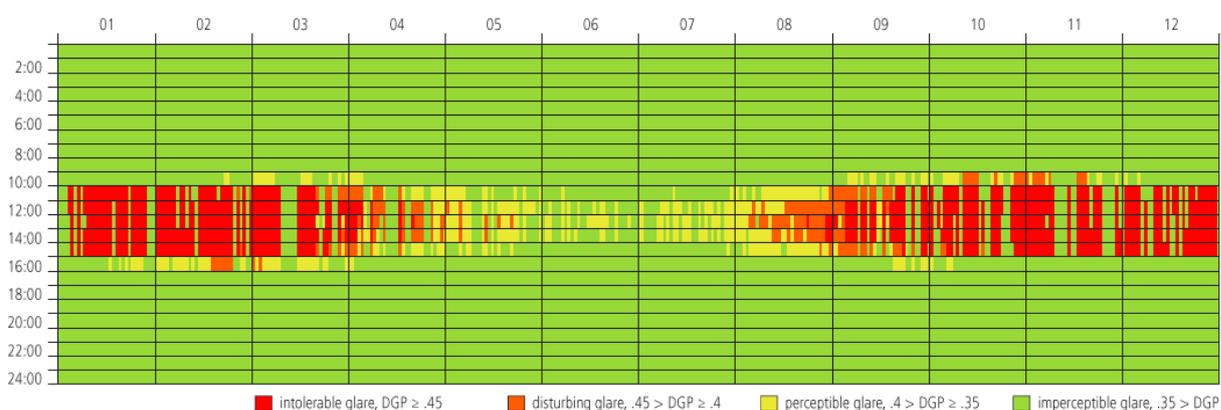
visive sia in termini di illuminazione naturale che in riduzione dell'abbagliamento. Tuttavia risulta particolarmente insoddisfacente dal punto di vista energetico. Per migliorare la prestazione in questo campo si agisce complessificando parzialmente la strategia come presentato nelle prossime pagine.

### MG\_L\_1\_i

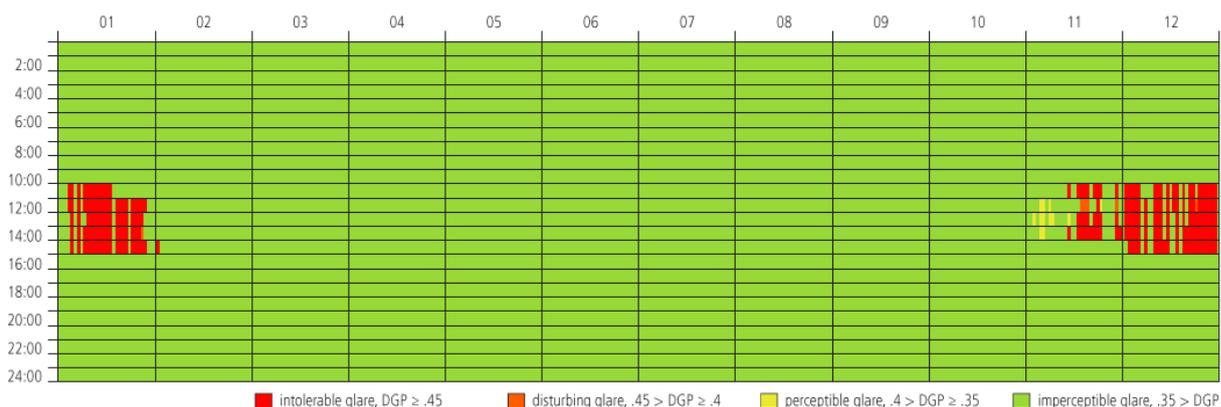
Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
MG_L_1_i	Linear Minimize Glare except winter time_1	(10-1) 15/12 - 15/01 Stadio 10	DGP > 0,4

Osserviamo i grafici che indicano la presenza e il grado di abbagliamento per il punto scelto per il calcolo del DGP in tutte le ore dell'anno.

#### EC massima trasparenza



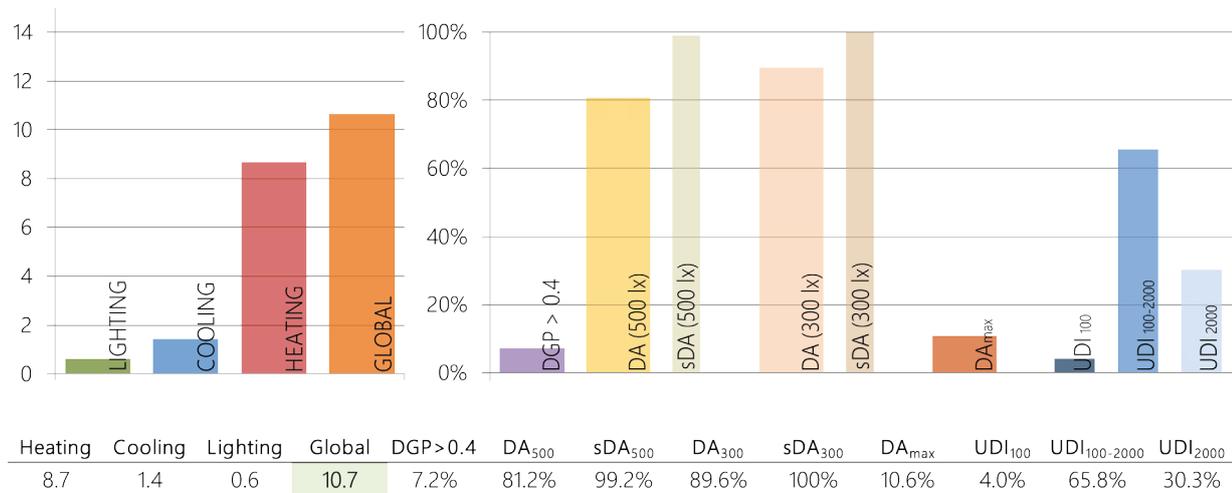
#### EC massima colorazione



Possiamo notare che nei periodi primaverile, autunnale ed estivo lo switch da massima trasparenza a massima colorazione produce un efficace miglioramento nella riduzione del DGP. Tuttavia nel periodo invernale, quando l'abbagliamento è di tipo diretto, dunque causato dalla presenza della sfera solare nel campo visivo dell'occupante, poiché anche nello stadio di massima colorazione il vetro elettrocromico non è in grado di eliminare il disturbo causato da tale fenomeno, lo switch allo stato 1 non apporta alcun miglioramento su questo campo. Poiché in questa parentesi temporale lo switch non elimina il problema dell'abbagliamento, ma riduce decisamente

l'illuminazione interna e gli apporti solari, la seguente strategia porta il vetro elettrocromico alla completa trasparenza in tale intervallo prediligendo l'obiettivo energetico a quello visivo.

kWh/m<sup>2</sup>y



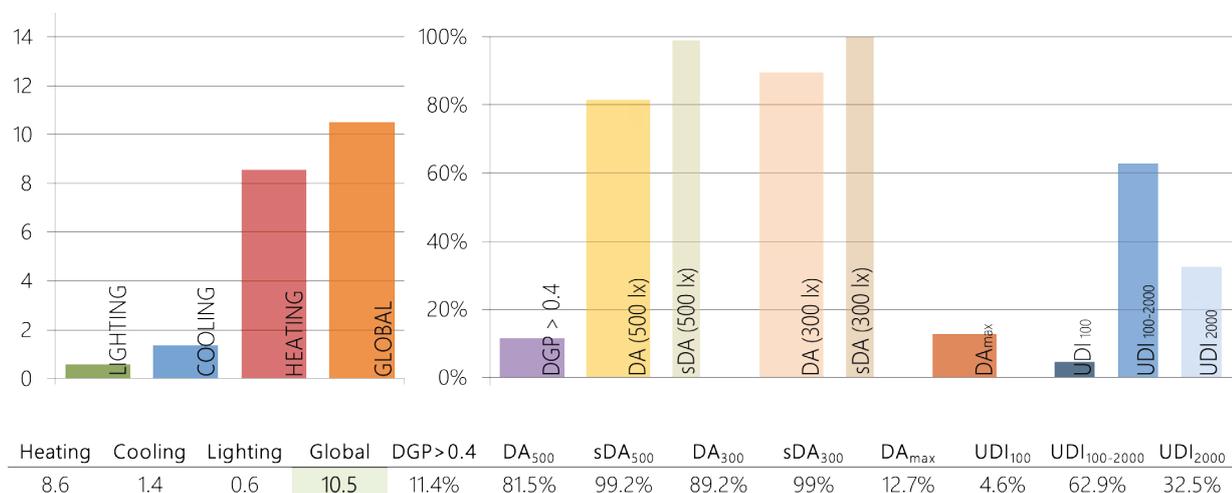
I risultati energetici presentano un effettivo miglioramento rispetto al caso precedente ( $EP_{MG\_L\_1} = 11,3 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ;  $EP_{MG\_L\_inv} = 10,7 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ) con un aumento ridottissimo di abbagliamento. Anche la DA aumenta leggermente ( $DA_{MG\_L\_1} = 80\%$ ;  $DA_{MG\_L\_inv} = 81.2\%$ ).

### MG\_L\_6\_i

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
MG_L_6_i	Linear Minimize Glare except winter time _6	(10-6) 15/12 - 15/01 Stadio 10	DGP > 0,4

Continuando a ragionare in tal senso è stato posto come stadio limite per il cambiamento di colorazione un stadio intermedio (stadio 6). Inoltre in periodo estivo viene posto come stadio di default fuori occupazione lo stadio 1 (completa colorazione) in modo da ridurre il più possibile gli apporti solari.

kWh/m<sup>2</sup>y



In questo modo si riesce a ridurre minimamente la domanda di energia, incidendo negativa-

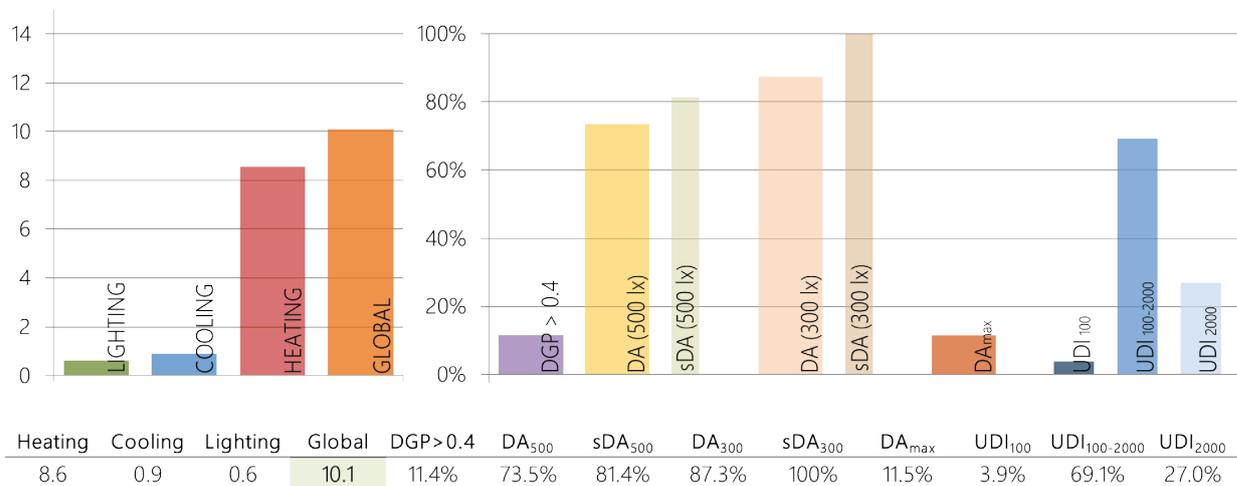
mente tuttavia sulla riduzione dell'abbagliamento; è discutibile se tali modifiche portino a un miglioramento che ne giustifichi l'attuazione.

### MG\_L\_6\_i-e

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
MG_L_1_i-e	Linear Minimize Glare, winter time 10, summer time 6	(10-1) 15/12 - 15/01 Stadio 10 15/06 - 15/09 Stadio 6 " no occupancy Stadio 1	DGP > 0,4

Per ridurre ulteriormente la domanda energetica si pone come stadio limite di trasparenza nel periodo estivo (quando si presuppone che le giornate siano relativamente più luminose rispetto a quelle invernali) uno stadio di colorazione intermedio (stadio 6).

kWh/m<sup>2</sup>y



Benché la prestazione energetica registri un lieve miglioramento e quella dell'abbagliamento risulti invariata, si ha un abbattimento del livello di illuminazione naturale. A seconda dell'obiettivo primario si agisce modificando i parametri di input della strategia.

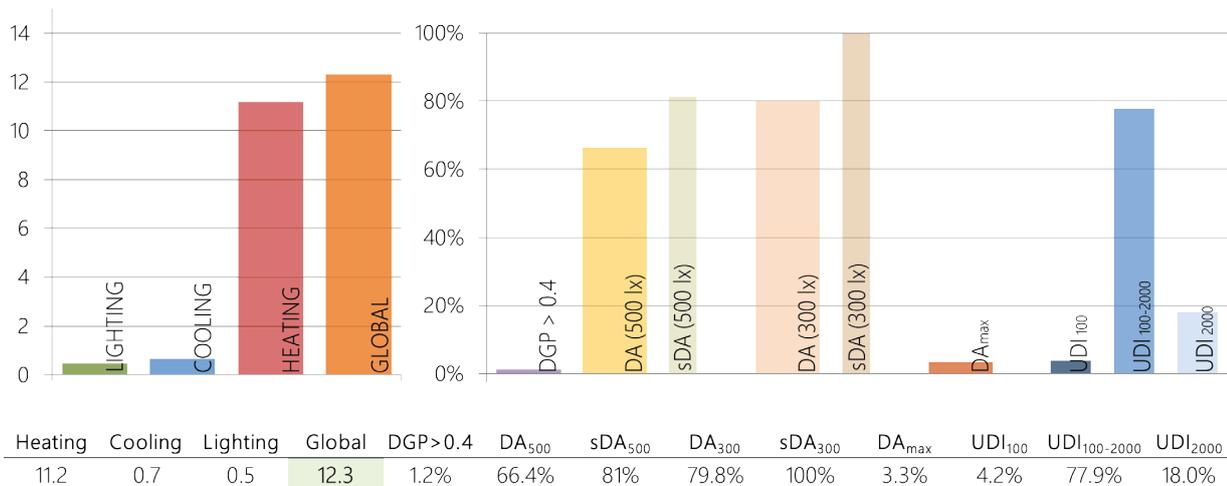
## 4.2.4 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO CON VENEZIANE

### U62/30\_B\_E

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
U62/30_B_E	Ultra 60 T_External Blinds	Veneziane: 0°, 15°, 30°	DGP > 0,4

Sul lato esterno della finestra con vetro selettivo Ultra 60 T viene posizionata una veneziana con lamelle orientabili secondo tre angoli (0°, 15°, 30°). Quando viene registrato un valore di DGP superiore a 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

kWh/m<sup>2</sup>y



La strategia elimina quasi completamente la presenza di abbagliamento a discapito dell'illuminazione naturale ( $DA_{U62/30\_V\_E} = 66\%$ ) e del dispendio energetico dovuto al riscaldamento (le veneziane esterne riducono drasticamente gli apporti solari).

### V72/38\_B\_E

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
V72/38_B_E	Vision 72_External Blinds	Veneziane: 0°, 15°, 30°	DGP > 0,4

Sul lato esterno della finestra con vetro selettivo Vision 72 viene posizionata una veneziana con lamelle orientabili secondo tre angoli (0°, 15°, 30°). Quando viene registrato un valore di DGP superiore a 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.



Heating	Cooling	Lighting	Global	DGP>0.4	DA <sub>500</sub>	sDA <sub>500</sub>	DA <sub>300</sub>	sDA <sub>300</sub>	DA <sub>max</sub>	UDI <sub>100</sub>	UDI <sub>100-2000</sub>	UDI <sub>2000</sub>
11.2	0.5	0.5	12.1	1.3%	62.9%	69%	78.8%	100%	2.4%	3.6%	80.6%	15.8%

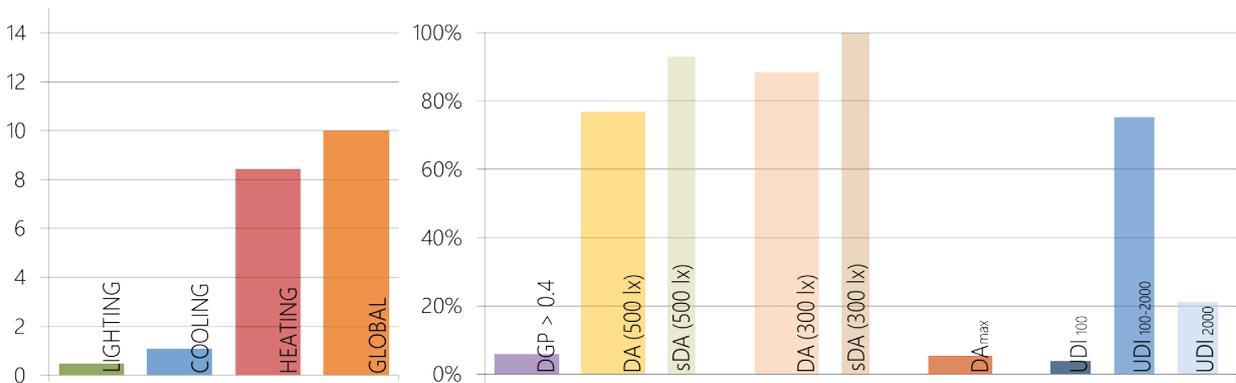
Anche in questo caso la presenza di abbagliamento è quasi del tutto eliminata. L'illuminazione naturale è minore rispetto al caso precedente ( $DA_{U62/30,V,E}=63\%$ ), così come il dispendio energetico dovuto al riscaldamento.

### U62/30\_B\_I

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
U62/30_B_I	Ultra 60 T_Internal Blinds	Veneziane: 0°, 15°, 30°	DGP > 0,4

Sull'interno del vetro selettivo Ultra 60 T viene posizionata una veneziana con lamelle orientabili secondo tre angoli (0°, 15°, 30°). Quando viene registrato un valore di DGP superiore a 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

kWh/m<sup>2</sup>y



Heating	Cooling	Lighting	Global	DGP>0.4	DA <sub>500</sub>	sDA <sub>500</sub>	DA <sub>300</sub>	sDA <sub>300</sub>	DA <sub>max</sub>	UDI <sub>100</sub>	UDI <sub>100-2000</sub>	UDI <sub>2000</sub>
8.4	1.1	0.5	10.0	5.9%	76.9%	93%	88.5%	100%	5.4%	3.7%	75.3%	21.0%

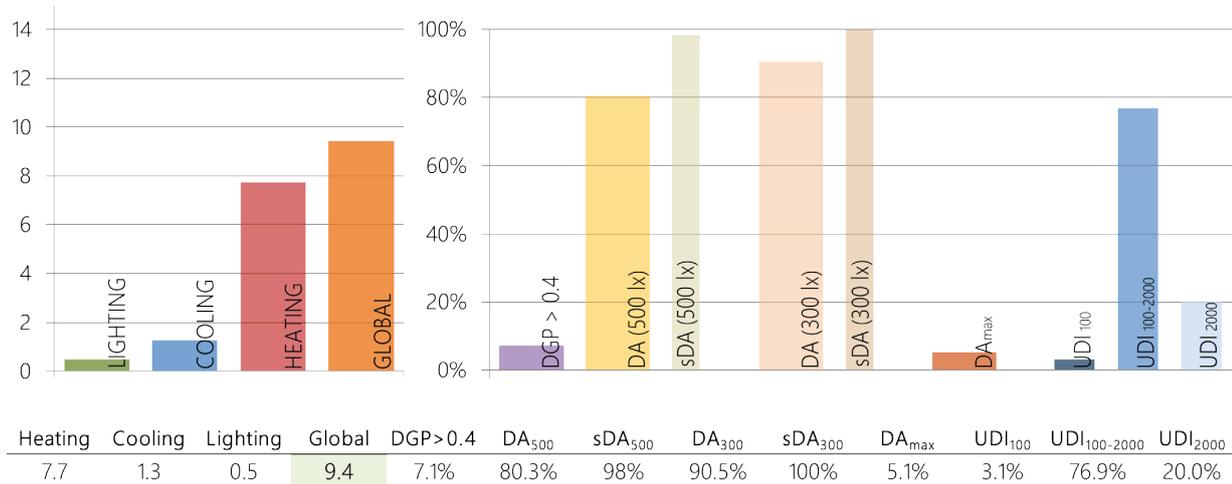
Il valore di DGP > 0,4 risulta molto vicino al risultato della strategia di controllo MG\_L\_1 ( $DGP_{MG,L_1} > 0,4 = 7\%$ ;  $DGP_{U62/30,V,I} > 0,4 = 6\%$ ) e il livello di illuminazione naturale è addirittura inferiore ( $DA_{MG,L_1} = 80\%$ ;  $DA_{U62/30,V,I} = 77\%$ ), tuttavia la domanda di energia scende considerevolmente con l'utilizzo delle veneziane interne ( $EP_{MG,L_1} = 11,3 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ;  $EP_{U62/30,V,I} = 10,0 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ).

### V72/38\_B\_I

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
V72/38_B_I	Vision 72_Internal Blinds	Veneziane: 0°, 15°, 30°	DGP > 0,4

Sull'interno del vetro selettivo Vision 72 viene posizionata una veneziana con lamelle orientabili secondo tre angoli (0°, 15°, 30°). Quando viene registrato un valore di DGP superiore a 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

kWh/m<sup>2</sup>y



Il valore di DGP > 0,4 è paragonabile ai valori ottenuti con il controllo lineare del vetro elettrocromico, così come il valore di DA. Rispetto ad esse tuttavia la domanda di energia viene drasticamente abbattuta ( $EP_{MG,L_1} = 11,3 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ;  $EP_{V72/38,V_1} = 9,4 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ).

### ML\_1\_B\_I

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
ML_1_B_I	Minimize Loads_ Internal Blinds	10, 1 Veneziane: 0°, 15°, 30°	DGP > 0,4 Carico di riscaldamento; Carico di raffreddamento

Sull'interno del vetro elettrocromico viene posizionata una veneziana con lamelle orientabili secondo tre angoli (0°, 15°, 30°). Il vetro elettrocromico è controllato secondo la strategia di minimizzazione dei carichi termici che utilizza come stadio limite la massima colorazione (Minimize Loads\_1). Quando viene registrato un valore di DGP superiore a 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

kWh/m<sup>2</sup>y



I risultati sono decisamente apprezzabili dal punto di vista energetico e di abbagliamento, ma decisamente scarsi dal punto di vista dell'illuminazione naturale ( $DA_{ML_1_B_I} > 0,4 = 47\%$ ). Questa

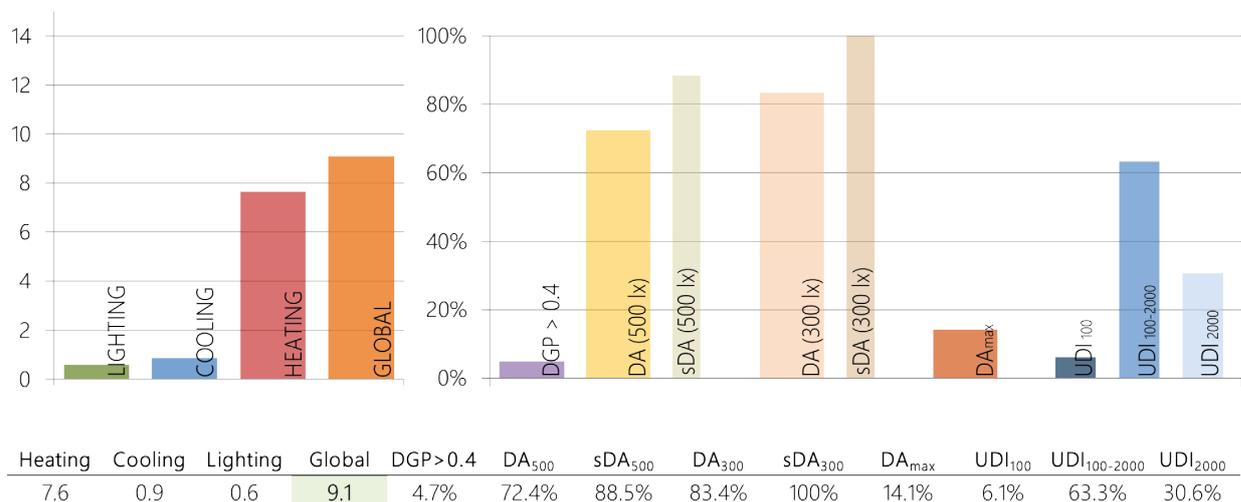
strategia riduce il rischio di abbagliamento più di tutte le precedenti ( $DGP_{ML_1B_I} > 0,4 = 5\%$ ), e porta a un dispendio energetico pari o inferiore ai casi selettivi.

### ML\_6\_B\_I

Nome	Nome completo	Stadi utilizzati	Soglie
ML_6_B_I	Minimize Loads_6_ Internal Blinds	10, 6 Veneziane: 0°, 15°, 30°	DGP > 0,4 Carico di riscaldamento; Carico di raffrescamento

Sull'interno del vetro elettrocromico viene posizionata una veneziana con lamelle orientabili secondo tre angoli (0°, 15°, 30°). Il vetro elettrocromico è controllato secondo la strategia di minimizzazione dei carichi termici che utilizza come stadio limite uno stato di colorazione intermedia (Minimize Loads\_6). Quando viene registrato un valore di DGP superiore a 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

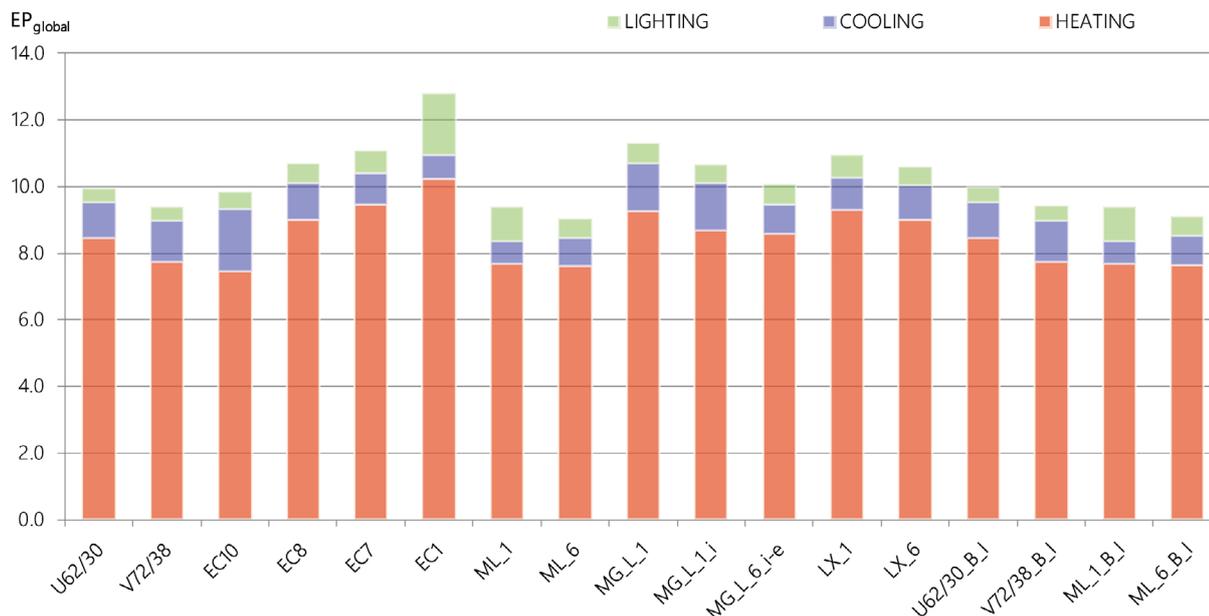
kWh/m<sup>2</sup>y



È la strategia che minimizza la domanda energetica ( $EP_{ML_6B_I} = 9,1 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ) e il rischio di abbagliamento ( $DGP_{ML_1B_I} > 0,4 = 5\%$ ), che risulta di pochissimo superiore alla strategia analizzata precedentemente, senza penalizzare eccessivamente l'illuminazione naturale ( $DA_{ML_1B_I} > 0,4 = 72\%$ ).

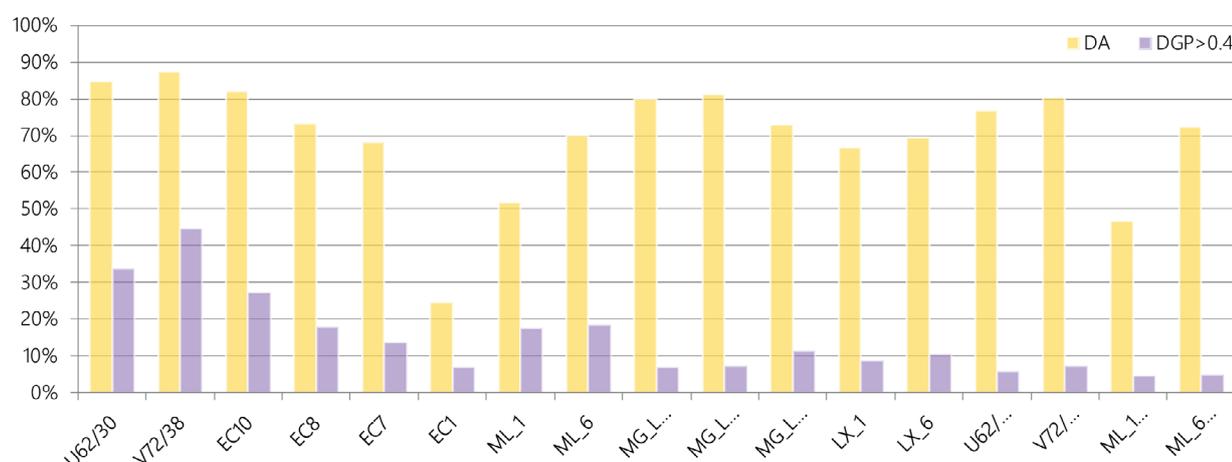
## 4.2.5 ANALISI CRITICA DEI RISULTATI OTTENUTI

In seguito a una selezione delle strategie più significative si presentano i risultati energetici e visivi a confronto.



Dal grafico emerge chiaramente la predominanza di richiesta energetica per riscaldamento, fattore maggiormente incidente sulla domanda finale di energia. Anche la richiesta di raffrescamento e illuminazione tuttavia risulta fondamentale: in particolare si può notare come i valori di questi due parametri risultino inversamente proporzionali: al diminuire della richiesta di raffrescamento (dovuta all'oscuramento del vetro o alla presenza delle veneziane) cresce il dispendio per l'illuminazione artificiale. Dunque per diminuire la richiesta energetica globale occorre minimizzare la somma di questi due parametri.

Le performance ottimali sono rappresentate dalle strategie che implicano l'uso delle veneziane. Con esse competono solamente le strategie volte a minimizzare i carichi termici e quelle lineari basate sul DGP più complesse, sacrificando tuttavia come abbiamo visto l'illuminazione naturale.



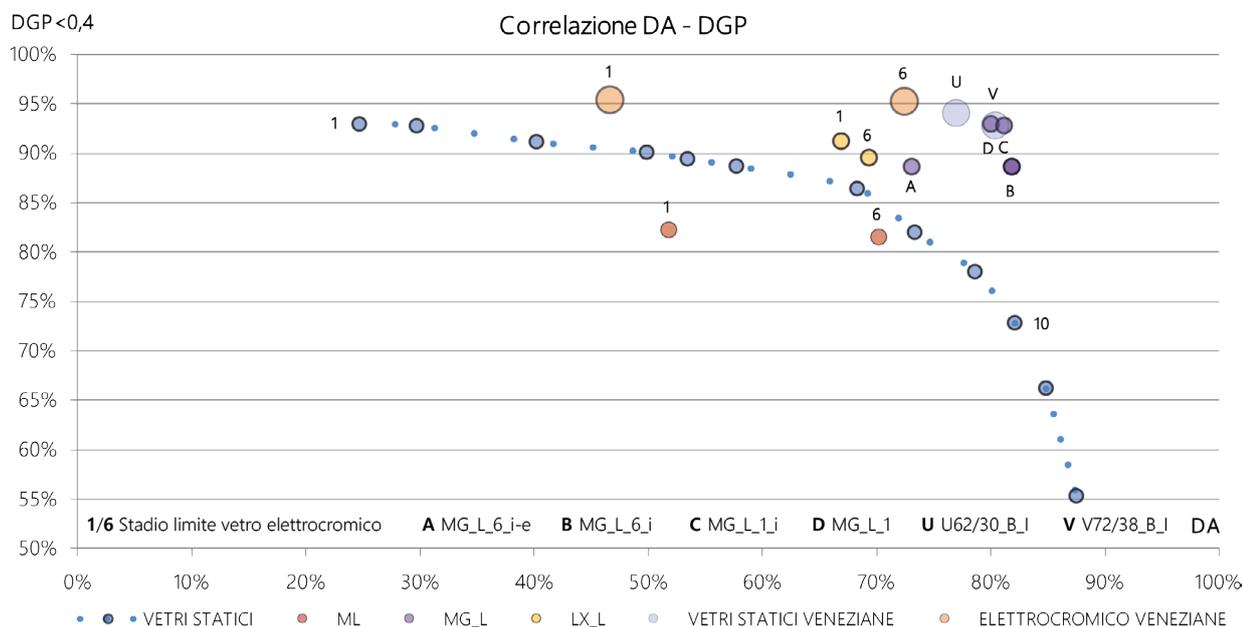
Le performance ottimali dal punto visivo sono raggiunte dalle strategie lineari basate sul vetro elettrocromico e sull'utilizzo delle veneziane. Alcune strategie lineari competono con la migliore (V72/38\_B\_1) sia per DA che per DGP senza il bisogno dell'installazione di un ulteriore sistema di oscuranti, tuttavia presentano maggiori consumi energetici. L'ultima strategia analizzata si

rivela un buon compromesso tra i tre obiettivi analizzati.

STRATEGIA		DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL
<b>U62/30</b>	Vetro selettivo	84.8%	33.8%	8.4	1.1	0.4	9.9
<b>V72/38</b>	Vetro selettivo	87.5%	44.7%	7.7	1.3	0.4	9.4
<b>EC10</b>	Elettrocromico trasparente	82.1%	27.2%	7.4	1.9	0.5	9.8
<b>EC8</b>	Elettrocromico semicolorato	73.3%	18.0%	9.0	1.1	0.6	10.7
<b>EC7</b>	Elettrocromico semicolorato	68.3%	13.6%	9.5	0.9	0.7	11.1
<b>EC1</b>	Elettrocromico colorato	24.7%	7.0%	10.2	0.7	1.8	12.8
<b>STRATEGIE on off</b>							
<b>ML_1</b>	Minimizzazione carichi termici	51.7%	17.7%	7.7	0.7	1.1	9.4
<b>ML_6</b>	Minimizzazione carichi termici	70.1%	18.4%	7.6	0.9	0.6	9.0
<b>STRATEGIE lineari</b>							
<b>MG_L_1</b>	Minimizzazione abbagliamento	80.0%	7.0%	9.3	1.4	0.6	11.3
<b>MG_L_1_j</b>	Minimizzazione abbagliamento	81.2%	7.2%	8.7	1.4	0.6	10.7
<b>MG_L_6_j-e</b>	Minimizzazione abbagliamento	73.1%	11.4%	8.6	0.9	0.6	10.1
<b>LX_1</b>	Da 30 a 50 000 lx, stadio max=1	66.9%	8.8%	9.3	1.0	0.7	10.9
<b>LX_6</b>	Da 30 a 50 000 lx, stadio max=6	69.3%	10.4%	9.0	1.0	0.6	10.6
<b>BLINDS</b>							
	Utilizzo delle veneziane						
<b>U62/30_B_I</b>	Vetro selettivo+min. abbagliamento	76.9%	5.9%	8.4	1.1	0.5	10.0
<b>V72/38_B_I</b>	Vetro selettivo+min. abbagliamento	80.3%	7.1%	7.7	1.3	0.5	9.4
<b>ML_1_B_I</b>	Min. carichi termici+abbagliamento	46.6%	4.6%	7.7	0.7	1.1	9.4
<b>ML_6_B_I</b>	Min. carichi termici+abbagliamento	72.4%	4.7%	7.6	0.9	0.6	9.1

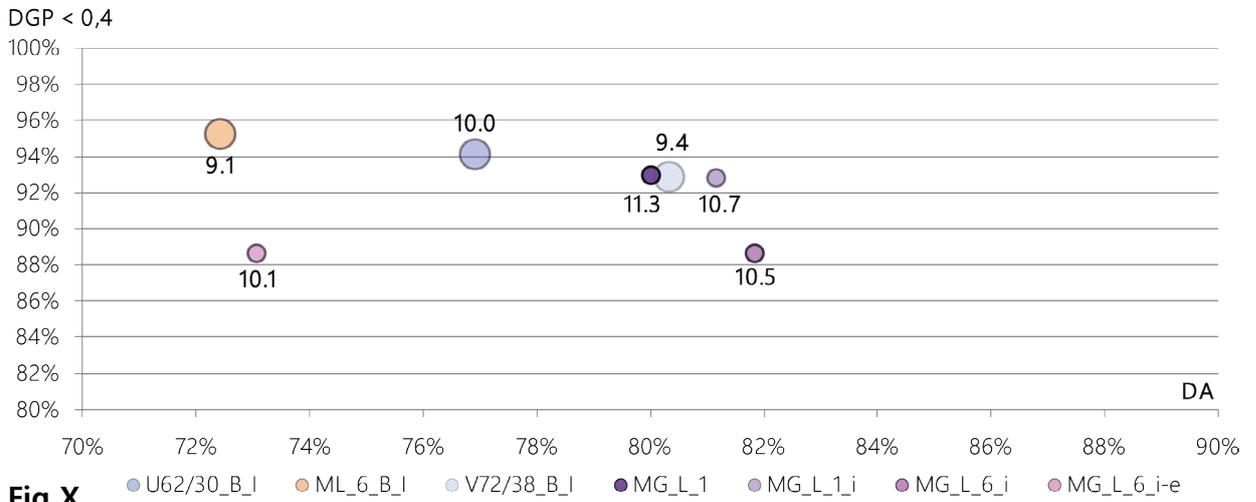
## CONFRONTO DA-DGP; EP-DGP

Risulta molto efficace effettuare graficamente un confronto tra le strategie analizzate tenendo come riferimento uno dei tre fattori indagati, in questo caso l'indice  $DGP < 0,4$ , indice che indica la percentuale di ore annuali in cui non si verifica abbagliamento.

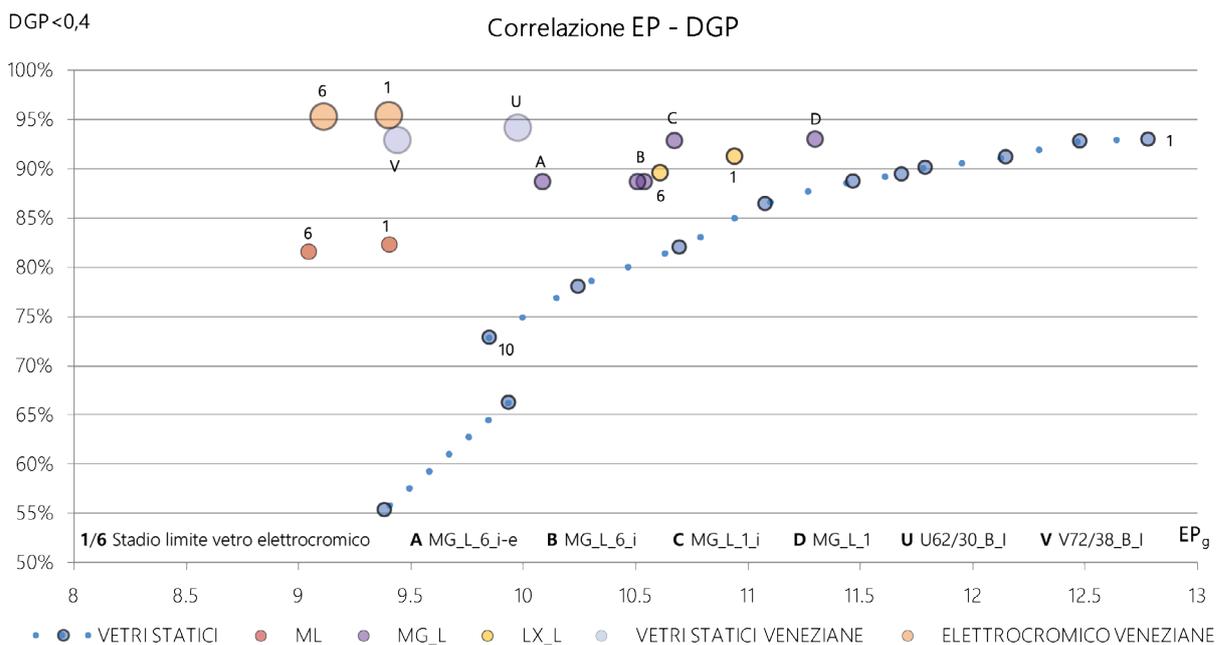


Viene riportato in ascissa la percentuale di tempo in cui i punti della superficie del piano di lavoro presentano illuminamento superiore a 500 lux (soglia di illuminazione per il lavoro di ufficio) grazie all'illuminazione naturale; in ordinata si trova la percentuale di tempo in cui sono assenti fenomeni di abbagliamento. La posizione teorica ottimale di un punto nel grafico è in alto a destra (massimizzazione della luce naturale e minimizzazione dell'abbagliamento). I risultati delle simulazioni condotte con vetri statici (vetro selettivo T162/g30; vetro selettivo T172/g38; vetro elettrocromico T55-8/g39-7); sono descritti dagli indicatori blu uniti da linea puntinata. Come si può notare essi descrivono una curva che è propria del fenomeno fisico di passaggio della luce attraverso una superficie trasparente. Un vetro statico trasparente necessariamente si discosta di poco da tale curva, variando piuttosto la sua posizione lungo di essa a seconda delle proprie caratteristiche. La posizione dei punti sulla curva è frutto di una media dei valori annuali; essi tuttavia variano notevolmente sia per causa che per intensità stagionalmente (basti ricordare la variazione del DGP dovuta al sole diretto invernale e all'alto contrasto nelle altre stagioni). Le potenzialità di un vetro dinamico rispetto a un vetro statico risiedono proprio nella possibilità di adattarsi all'esigenza puntuale nel tempo e dunque di spostarsi, anche con variazioni notevoli, dalla curva descritta dai vetri statici. Nel grafico sopra descritto lo scostamento dalla curva porta ovviamente miglioramenti solo dal punto di vista dell'assenza di abbagliamento: la leggera colorazione che caratterizza il vetro elettrocromico anche allo stadio di massima trasparenza implica una riduzione della luce entrante in ambiente. Le strategie di controllo del vetro che permettono di raggiungere i risultati migliori risultano quelle basate sul controllo lineare della colorazione basata sull'abbattimento della soglia DGP sotto lo 0,4. È molto interessante notare come queste ultime strategie portino a prestazioni paragonabili a quelle di un vetro selettivo con controllo dell'abbagliamento basato sull'utilizzo di veneziane interne (Fig X). Dunque in questo caso l'utilizzo di un vetro elettrocromico permette di evitare l'installazione del sistema di oscuramento

interno mantenendo una performance simile. A bilanciare il costo decisamente maggiore di una vetrata elettrocromica si trova il risparmio sull'acquisto e la manutenzione del sistema di veneziane e la possibilità di mantenere il contatto visivo con l'ambiente esterno. Tuttavia il consumo energetico finale risulta maggiore rispetto ai casi con veneziane esaminati.

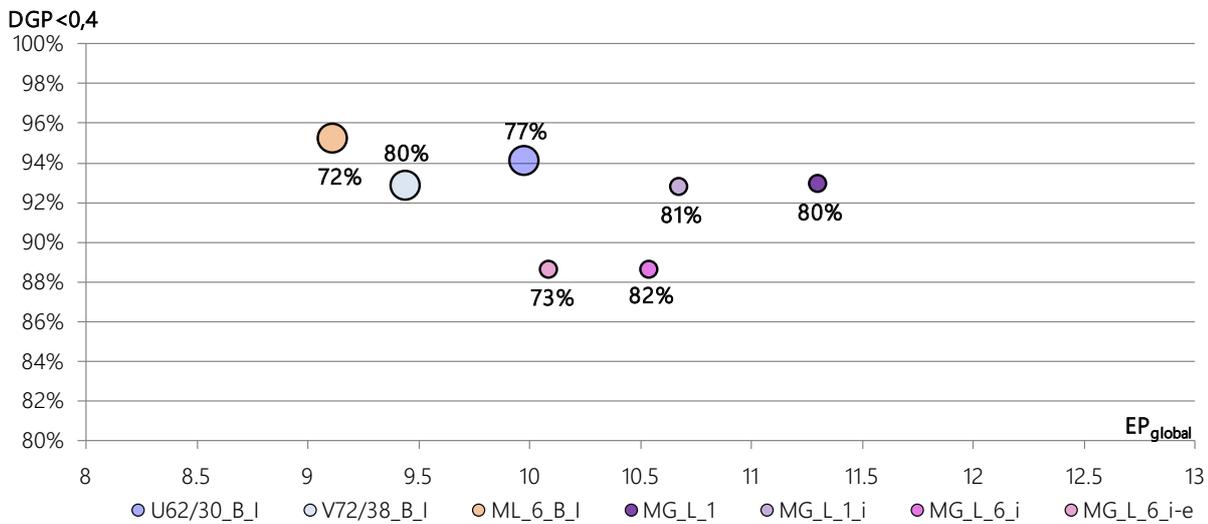


Si può notare inoltre come dal punto di vista del comfort visivo le strategie basate sulla minimizzazione dei carichi termici stiano sotto la linea delle references. Le strategie basate sul controllo lineare non apportano particolari miglioramenti e risultano scarse se confrontate con le strategie basate su altri tipi di input, quale il DGP. Il controllo del vetro elettrocromico con minimizzazione dei carichi termici associato al controllo dell'abbagliamento mediante veneziane risulta la strategia che porta al minor consumo energetico, migliorando le prestazioni rispetto ai vetri statici anche dal punto di vista dell'abbagliamento. Quest'ultimo dato è probabilmente dovuto all'influenza sulla parte di abbagliamento dovuta all'alto contrasto di luminanza, che la colorazione del vetro abbatte in modo deciso.



Nel grafico successivo è possibile ragionare sul comportamento dei due parametri che varia-

no positivamente con l'utilizzo del vetro elettrocromico. In ascissa viene riportato la domanda energetica globale annuale per metro quadro e in ordinata la percentuale oraria con assenza di abbagliamento. La posizione teorica ottimale di un punto nel grafico è in alto a sinistra (minimizzazione dell'abbagliamento e della domanda di energia).



Osservando il grafico è possibile notare come anche in questo caso l'utilizzo di una strategia di controllo permette di allontanarsi dalla curva che denota il comportamento dei vetri statici. Tutte le strategie risultano migliorative rispetto ai vetri statici selettivi dal punto di vista dell'abbagliamento, ma non altrettanto dal punto di vista del consumo energetico. Le prestazioni migliori in entrambe le direzioni sono raggiunte dalle strategie basate sull'utilizzo delle veneziane. La massima prestazione è data dalla strategia che affianca le veneziane allo switch elettrocromico. Essa migliora le prestazioni dei casi con vetri statici grazie alla più intensa colorazione del vetro che permette la riduzione dell'abbagliamento dovuto al contrasto tra zone ad alta e bassa luminanza; al contempo le veneziane permettono di ridurre al minimo l'abbagliamento per sole diretto. Il posizionamento interno delle veneziane permette di non incidere negativamente sulla prestazione energetica. È possibile notare che la prestazione di alcune strategie lineari senza l'utilizzo di veneziane si avvicina a quella delle references con utilizzo di veneziane, dunque anche dal punto del vista energetico l'utilizzo di una adeguata strategia di controllo su un vetro elettrocromico può eludere l'utilizzo delle veneziane.

## Indicatori di medie dimensioni

**U62/30:** Vetro selettivo,  $T_v = 0,62$ ,  $g = 30$

**V72/38:** Vetro selettivo,  $T_v = 0,72$ ,  $g = 38$

**EC 10** o **EC55/39:** Vetro elettrocromico allo stadio di massima trasparenza.  $T_v = 0,55$ ,  $g = 39$

**EC 6** o **EC28/17:** Vetro elettrocromico allo stadio di colorazione intermedia.  $T_v = 0,28$ ,  $g = 17$

**EC 1** o **EC8/7:** Vetro elettrocromico allo stadio di massima colorazione.  $T_v = 0,08$ ,  $g = 7$

**ML\_1:** Minimizzazione dei carichi termici. Vetro elettrocromico settato allo stato di massima trasparenza (**EC 10**) in presenza di un carico di riscaldamento; stato di massima colorazione (**EC 1**) in presenza di un carico di raffrescamento.

**ML\_6:** Minimizzazione dei carichi termici. Vetro elettrocromico settato alla massima trasparenza (**EC 10**) in presenza di un carico di riscaldamento; colorazione intermedia (**EC 6**) in presenza di un carico di raffrescamento.

**MG\_1:** Minimizzazione abbagliamento. Vetro elettrocromico settato allo stato di massima colorazione ogni qual volta l'indice DGP supera lo 0,4.

**LX\_1:** Nell'intervallo tra 30 000 e 50 000 lux il vetro si scurisce fino allo stato di massima colorazione con una variazione lineare (switch ogni 2500 lux).

**LX\_6:** Nell'intervallo tra 30 000 e 50 000 lux il vetro si scurisce fino a uno stato di colorazione intermedia (EC 6) con una variazione lineare (switch ogni 2500 lux).

**MG\_L\_1:** Ogni volta che la soglia 0,4 viene superata il vetro compie uno switch verso lo stadio con colorazione appena più intensa a quello in cui si trova.

**MG\_L\_1\_i:** come **MG\_L\_1**; vetro elettrocromico settato alla massima trasparenza tra 15/12 e 15/01.

**MG\_L\_6\_i:** come **MG\_L\_1\_i**, ma con stadio 6 (**EC28/17**) come limite di intensità di colorazione.

**MG\_L\_6\_i-e:** come **MG\_L\_6\_i**; vetro elettrocromico settato allo stadio 6 tra 15/06 e 15/09 e allo stadio 1 nello stesso intervallo quando non c'è occupazione.

## Indicatori di grandi dimensioni: veneziane

**U62/30\_B\_E:** Minimizzazione abbagliamento con veneziana esterna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°) con vetro **U62/30**. Con  $DGP > 0,4$  il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

**V72/38\_B\_E:** Come **U62/30\_B\_E**; vetro **V72/38**.

**U62/30\_B\_I:** Minimizzazione abbagliamento con veneziana interna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°) con vetro **U62/30**. Con  $DGP > 0,4$  il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

**V72/38\_B\_I:** Come **U62/30\_B\_I**; vetro **V72/38**.

**ML\_1\_B\_I:** Vetro elettrocromico. Minimizzazione dei carichi termici con regolazione 10-1; minimizzazione abbagliamento con veneziana interna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°). Con  $DGP > 0,4$  il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

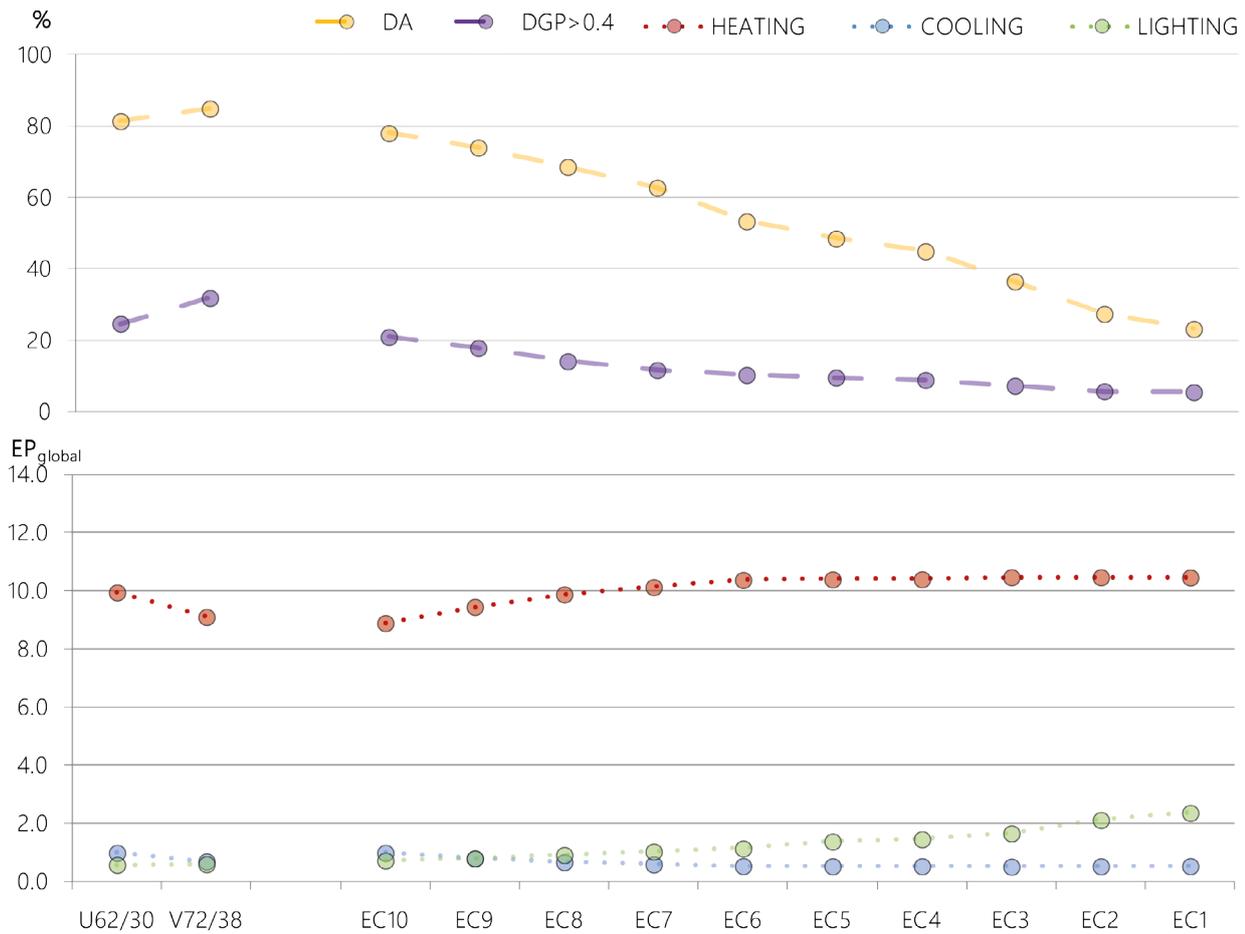
**ML\_6\_B\_I:** Come **ML\_1\_B\_I**; Minimizzazione dei carichi termici con regolazione 10-6.

### 4.3 ANALISI EFFETTUATE SU TORINO \_ WWR 0.5

Sono di seguito presentati i risultati visivi e termici delle analisi condotte nella città di Torino considerando l'ufficio con finestra vetrata (Rapporto muro/finestra pari a 0,5) sulla facciata esposta a Sud.

#### 4.3.1 ANALISI SU VETRI STATICI

Seguono le analisi condotte sui vetri statici di riferimento.

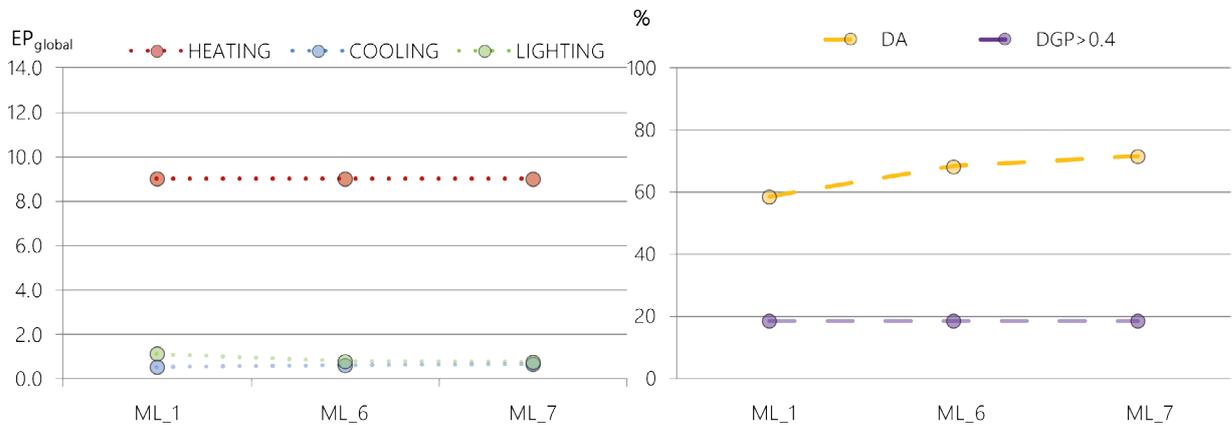


	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
U62/30	81.4%	24.7%	9.9	1.0	0.6	11.5	1.6
V72/38	84.9%	31.9%	9.1	0.7	0.6	10.4	1.3
EC10	78.0%	20.9%	8.9	1.0	0.7	10.6	1.7
EC9	74.0%	17.9%	9.5	0.8	0.8	11.1	1.6
EC8	68.6%	14.2%	9.9	0.7	0.9	11.5	1.6
EC7	62.8%	11.7%	10.1	0.6	1.0	11.8	1.6
EC6	53.3%	10.3%	10.4	0.5	1.1	12.1	1.7
EC5	48.5%	9.6%	10.4	0.5	1.4	12.3	1.9
EC4	44.9%	8.9%	10.4	0.5	1.5	12.4	2.0
EC3	36.5%	7.3%	10.5	0.5	1.7	12.7	2.2
EC2	27.4%	5.8%	10.5	0.5	2.1	13.1	2.7
EC1	23.2%	5.5%	10.5	0.5	2.4	13.4	2.9

Osservando i risultati sopra presentati notiamo il ripetersi dei fenomeni identificati nel caso con WWR 1, quali lo stabilizzarsi della domanda di energia per riscaldamento e di illuminazione oltre un certo stadio di colorazione. Con il ridimensionamento del componente trasparente diminuiscono gli apporti solari e aumenta l'influenza della domanda di energia per illuminazione, dunque la minimizzazione del fabbisogno per raffrescamento + illuminazione si sposta su stadi con colorazione più chiara (stadi 9 e 8).

#### 4.3.2 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO ON/OFF

Seguono le analisi delle prestazioni derivanti dal controllo del vetro elettrocromico con strategie on/off basate su obiettivi visivi ed energetici. Rispetto al caso Torino WWR 1 è stata operata una selezione delle strategie significative, aggiungendo una strategia per la minimizzazione del fabbisogno termico (ML\_7) che utilizza come stadio limite del vetro elettrocromico uno stadio di colorazione intermedia tendente al chiaro (stadio 7).



ON/OFF	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
ML_1	58.6%	18.6%	9.0	0.5	1.1	10.7	1.7
ML_6	68.2%	18.6%	9.0	0.6	0.8	10.4	1.4
ML_7	71.6%	18.6%	9.0	0.7	0.8	10.4	1.4

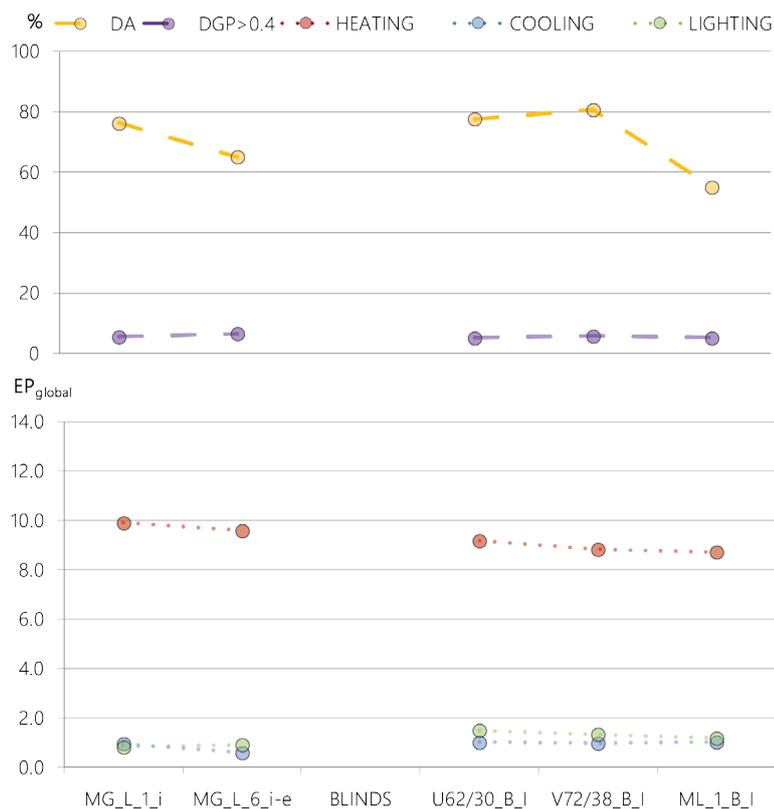
Le tre strategie portano a valori di dispendio energetico pari a quelli del vetro selettivo Vision 72 ( $EP_{V72/38} = 10,4 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ;  $EP_{ML} = 10,4 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ): l'utilizzo del vetro elettrocromico su finestre di media dimensione non apporta miglioramenti energetici ma può apportare solo miglioramenti dal punto di vista della riduzione dell'abbagliamento. Le strategie volte alla minimizzazione del carico termico portano a risultati visivi scarsi, eccettuata la strategia che pone come stadio limite lo stadio 7.

È interessante notare che la riduzione dell'abbagliamento nei tre casi presentati qui sopra è esattamente la stessa, ma con valori di DA notevolmente differenti. La strategia ML\_6 risulta la più efficace dal punto di vista energetico, anche se viene superata da ML\_7 a livello di illuminazione naturale.

### 4.3.3 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO LINEARE E CON VENEZIANE

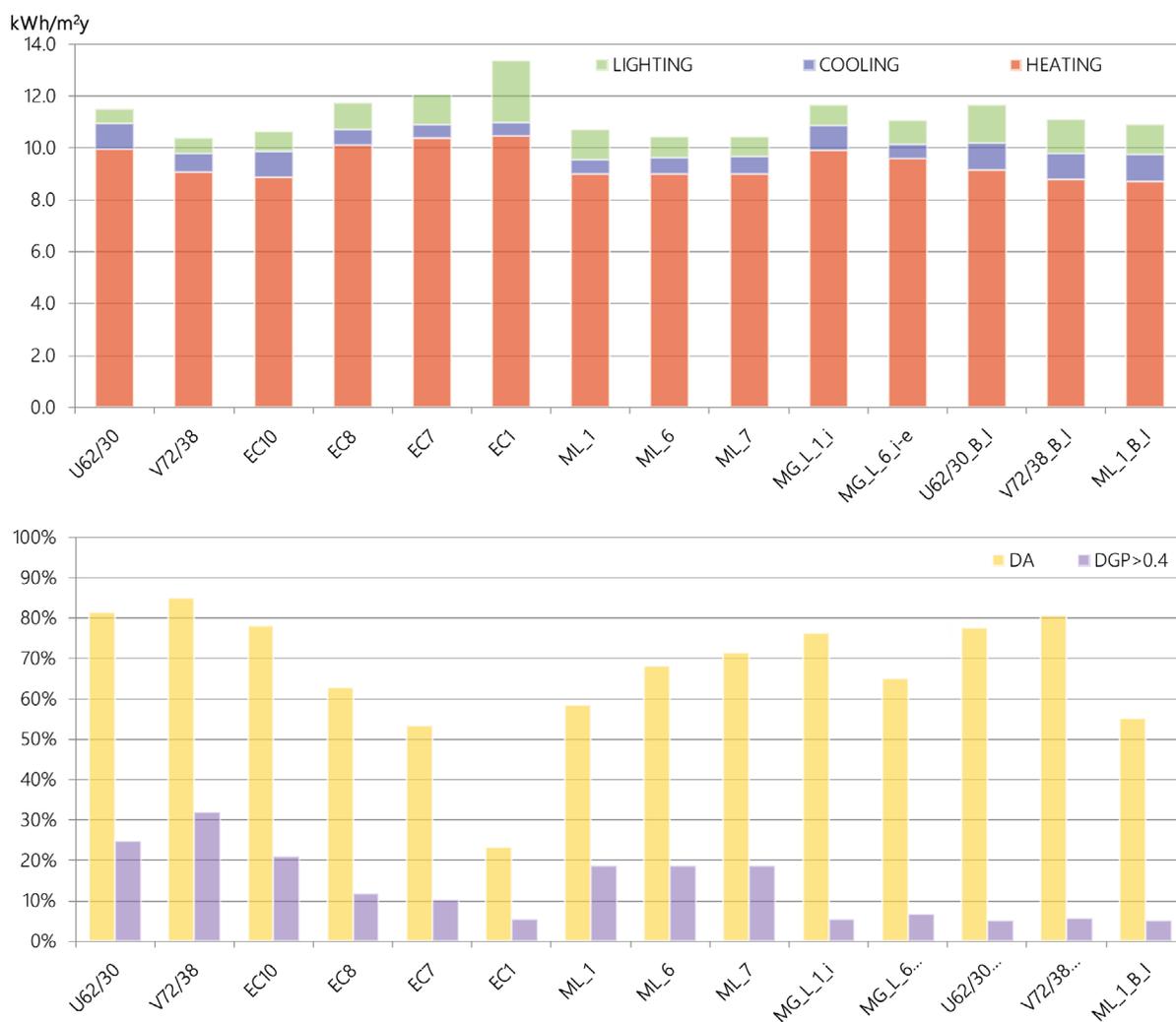
In seguito alle analisi precedentemente presentate è stata effettuata la selezione di due strategie di controllo lineari dando priorità al comfort visivo in un caso e al risparmio energetico nell'altro.

Esaminando i risultati derivanti dal controllo lineare del vetro elettrocromico si legge una riduzione del rischio di abbagliamento in confronto al caso con WWR 1, dovuto alla minore dimensione della finestra. Nel caso precedente il rischio di abbagliamento veniva ridotto fino al 7%; in questo caso si arriva fin al 5,5%. Vi è anche una riduzione del livello di illuminazione naturale interna, e un aumento dei consumi energetici, dimostrazione dell'importanza degli apporti solari nel bilancio energetico dell'edificio. Esaminando i risultati derivanti dal controllo dei vetri selettivi con le veneziane troviamo risultati molto simili ai precedenti, in particolare nel confronto con il vetro Ultra 60, sia sul livello energetico (con una crescita dei dispendi dovuta all'aumentare della richiesta di energia per illuminazione) che sul livello visivo. La strategia che associa il controllo dei carichi termici con switch su elettrocromico e il controllo dell'abbagliamento con veneziane porta a una riduzione della domanda energetica, comportando tuttavia una forte penalizzazione della DA.



LINEARI	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
MG_L_1_i	76.2%	5.5%	9.9	1.0	0.8	11.7	1.8
MG_L_6_j-e	65.1%	6.6%	9.6	0.6	0.9	11.1	1.5
BLINDS							
U62/30_B_I	78%	5.1%	9.2	1.0	1.5	11.7	2.5
V72/38_B_I	81%	5.8%	8.8	1.0	1.3	11.1	2.3
ML_1_B_I	55.1%	5.1%	8.7	1.0	1.2	10.9	2.2

#### 4.3.4 ANALISI CRITICA DEI RISULTATI OTTENUTI



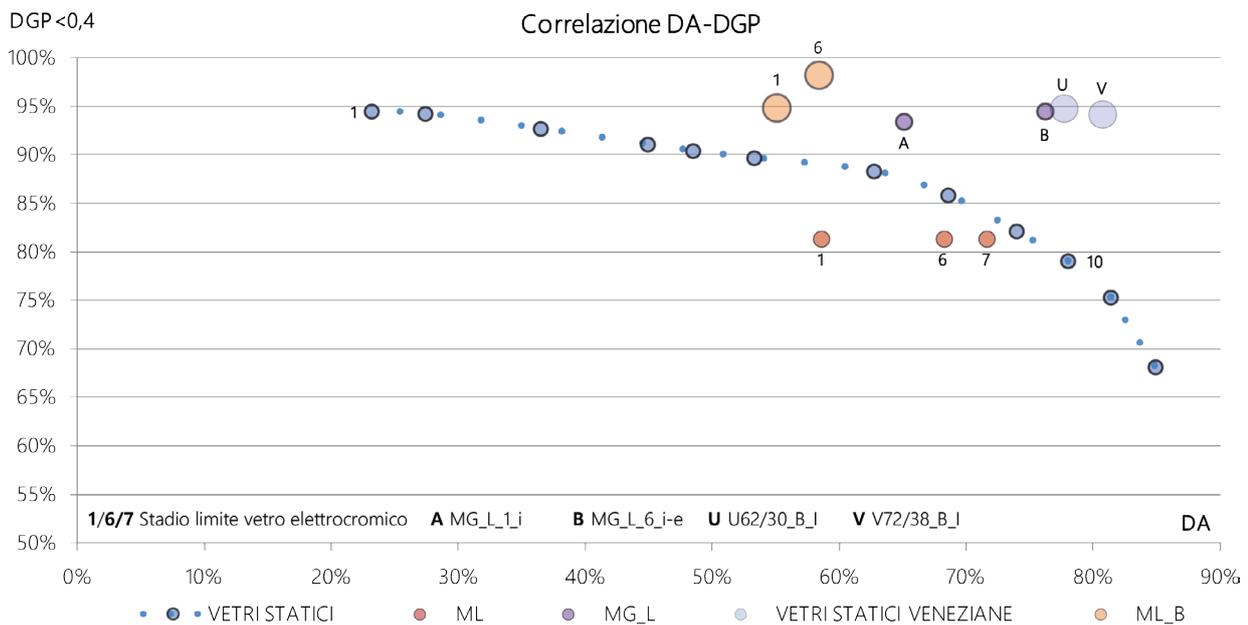
In quasi tutti i casi il controllo del componente vetrato, sia esso condotto con switch sia con l'uso delle veneziane, aumenta il dispendio energetico rispetto ai vetri statici chiari. L'utilizzo del controllo dunque può avere come obiettivo solo l'aumento del comfort visivo. Su questa direzione è preferibile l'utilizzo di vetri selettivi con veneziane o di strategie lineari su elettrocromico.

Le strategie di minimizzazione dei carichi termici infatti portano a risultati comparabili agli stati base mostrando però una scarsa performance nella riduzione dell'abbagliamento.

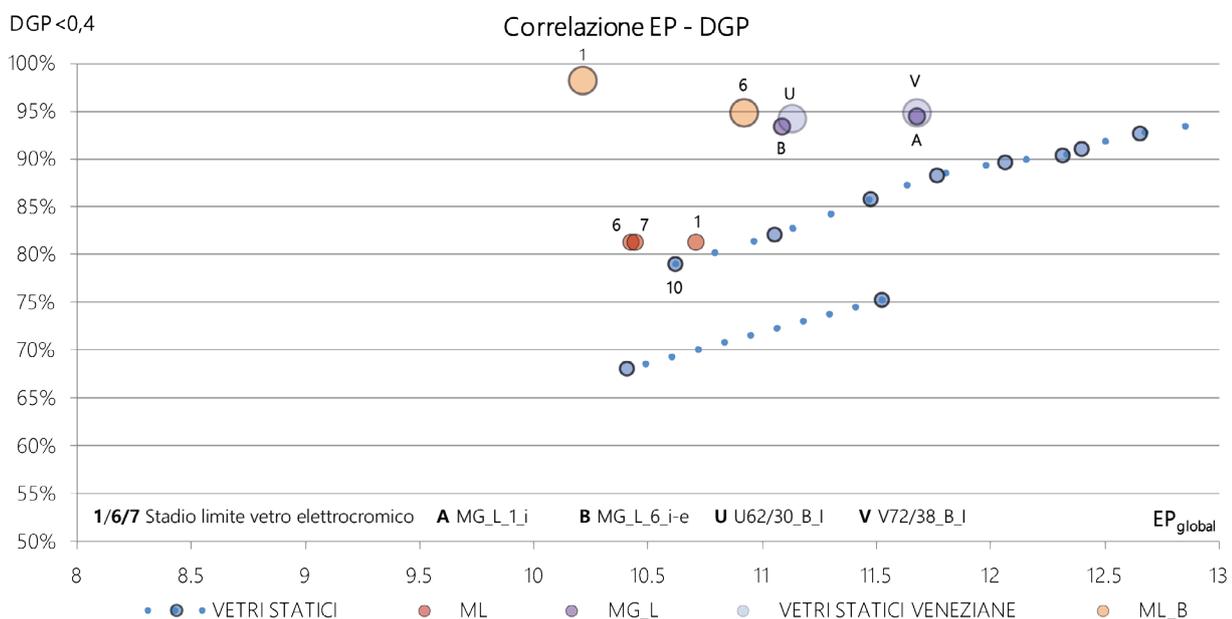
STRATEGIA	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL
U62/30	81.4%	24.7%	9.9	1.0	0.6	11.5
V72/38	84.9%	31.9%	9.1	0.7	0.6	10.4
EC10	78.0%	20.9%	8.9	1.0	0.7	10.6
EC8	62.8%	11.7%	10.1	0.6	1.0	11.8
EC7	53.3%	10.3%	10.4	0.5	1.1	12.1
EC1	23.2%	5.5%	10.5	0.5	2.4	13.4
<b>STRATEGIE ON OFF</b>						
ML_1	58.6%	18.6%	9.0	0.5	1.1	10.7
ML_6	68.2%	18.6%	9.0	0.6	0.8	10.4
ML_7	71.6%	18.6%	9.0	0.7	0.8	10.4

STRATEGIE LINEARI						
MG_L_1_i	76.2%	5.5%	9.9	1.0	0.8	11.7
MG_L_6_i-e	65.1%	6.6%	9.6	0.6	0.9	11.1
BLINDS						
U62/30_B_I	77.7%	5.1%	9.2	1.0	1.5	11.7
V72/38_B_I	80.7%	5.8%	8.8	1.0	1.3	11.1
ML_1_B_I	55.1%	5.1%	8.7	1.0	1.2	10.9

A livello di comfort visivo tutte le strategie lineari, siano esse basate sullo switch elettrocromico o sull'uso delle veneziane, portano a risultati comparabili per riduzione di abbagliamento e con sostanziali differenze sulla riduzione della DA. Alcune strategie lineari reggono il confronto con l'uso delle veneziane sui vetri selettivi, a discapito del consumo energetico.



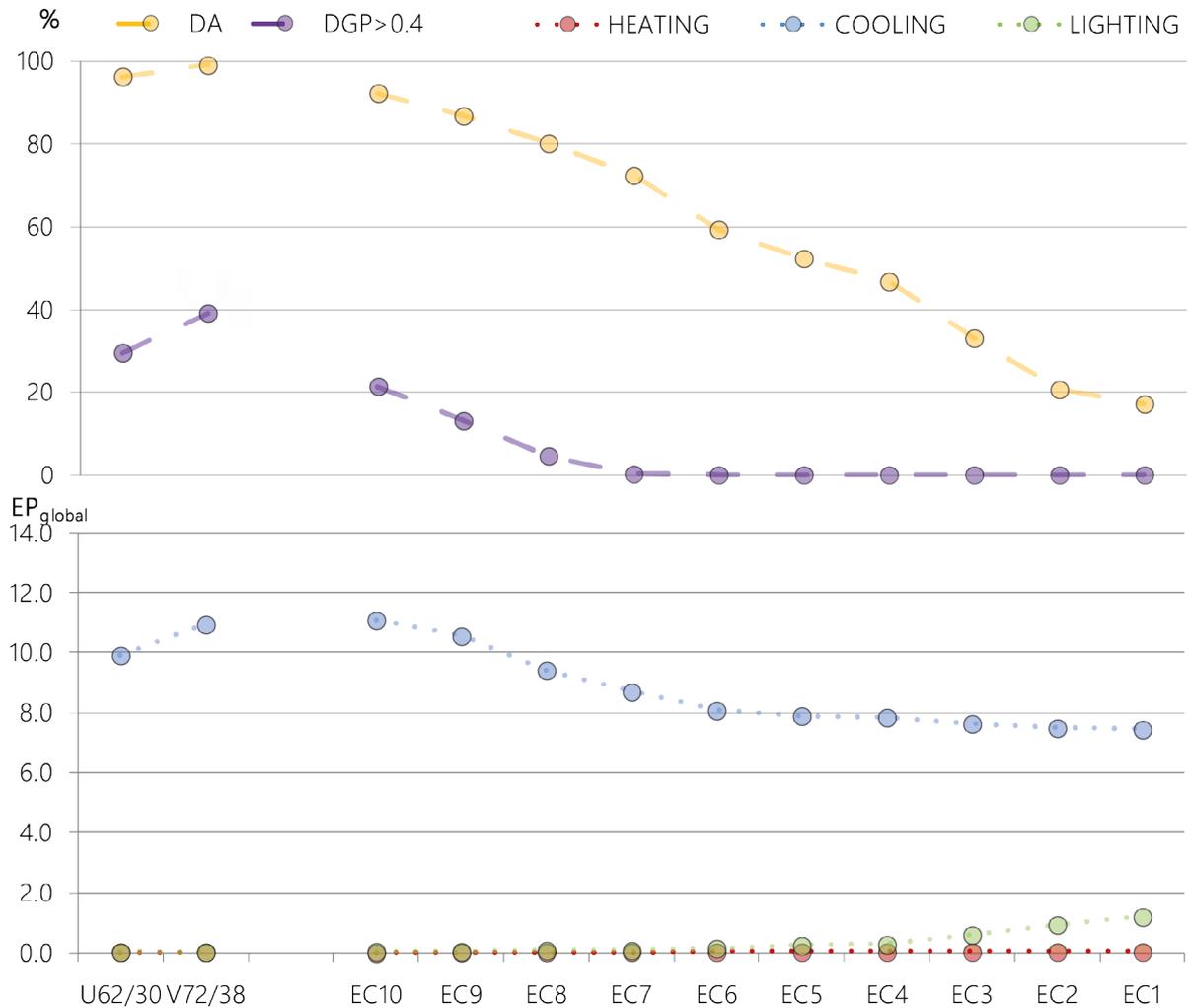
Confrontando il rischio di abbagliamento e il consumo energetico si nota che le strategie lineari dell'elettrocromico sono paragonabili a quelle con veneziane dei vetri selettivi; tuttavia esse non risultano le migliori nella riduzione del fabbisogno energetico.



## 4.4 ANALISI EFFETTUATE SU ABU DHABI \_ WWR 1

Sono di seguito presentati i risultati visivi e termici delle analisi condotte nella città di Abu Dhabi, città con fabbisogno quasi esclusivo di raffrescamento considerando l'ufficio con facciata totalmente vetrata esposta a Sud.

### 4.4.1 ANALISI SU VETRI STATICI

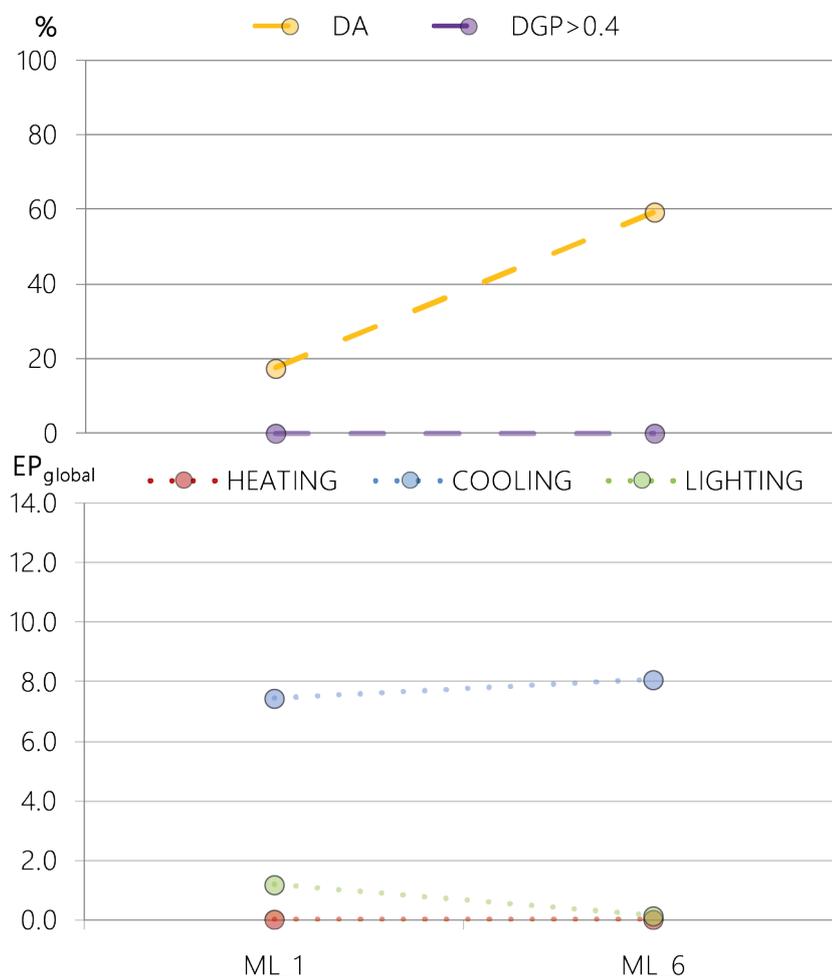


	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
U62/30	96.3%	29.6%	0.0	9.9	0.0	10.0	10.0
V72/38	99.1%	39.2%	0.0	10.9	0.0	11.0	11.0
EC10	92.3%	21.5%	0.0	11.1	0.1	11.1	11.1
EC9	86.8%	13.1%	0.0	10.6	0.1	10.6	10.6
EC8	80.2%	4.7%	0.0	9.4	0.1	9.6	9.5
EC7	72.4%	0.2%	0.0	8.7	0.1	8.8	8.8
EC6	59.3%	0.0%	0.0	8.1	0.2	8.3	8.2
EC5	52.3%	0.0%	0.0	7.9	0.3	8.2	8.2
EC4	<b>46.8%</b>	<b>0.0%</b>	<b>0.0</b>	<b>7.9</b>	<b>0.3</b>	<b>8.2</b>	<b>8.1</b>
EC3	33.1%	0.0%	0.0	7.6	0.6	8.3	8.3
EC2	20.7%	0.0%	0.0	7.5	0.9	8.5	8.4
EC1	17.2%	0.0%	0.0	7.5	1.2	8.7	8.7

Si notano diversi fattori molto interessanti: data la posizione geografica della città e la traiettoria solare molto vicina allo zenit il problema dell'abbagliamento risulta risolvibile con i primi stadi di colorazione: infatti non esiste abbagliamento diretto, ma solo per contrasto. Già dallo stadio 7 l'abbagliamento risulta quasi del tutto assente. Anche quando il vetro viene mantenuto allo stato di massima colorazione per tutto l'anno si registra un fabbisogno di riscaldamento irrisorio.

#### 4.4.2 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO ON/OFF

Come si può osservare dal grafico e dalla tabella dei risultati delle analisi dei vetri statici, per le condizioni climatiche della zona ad Abu Dhabi è del tutto assente l'esigenza di riscaldamento, ma la prestazione energetica deriva totalmente dal fabbisogno di raffrescamento e illuminazione. Dunque le strategie basate sulla minimizzazione dei carichi termici si riducono allo switch allo stadio limite per tutti i momenti dell'anno. In questo caso il comportamento del vetro elettrocromico è del tutto assimilabile a quello di un normale vetro colorato.

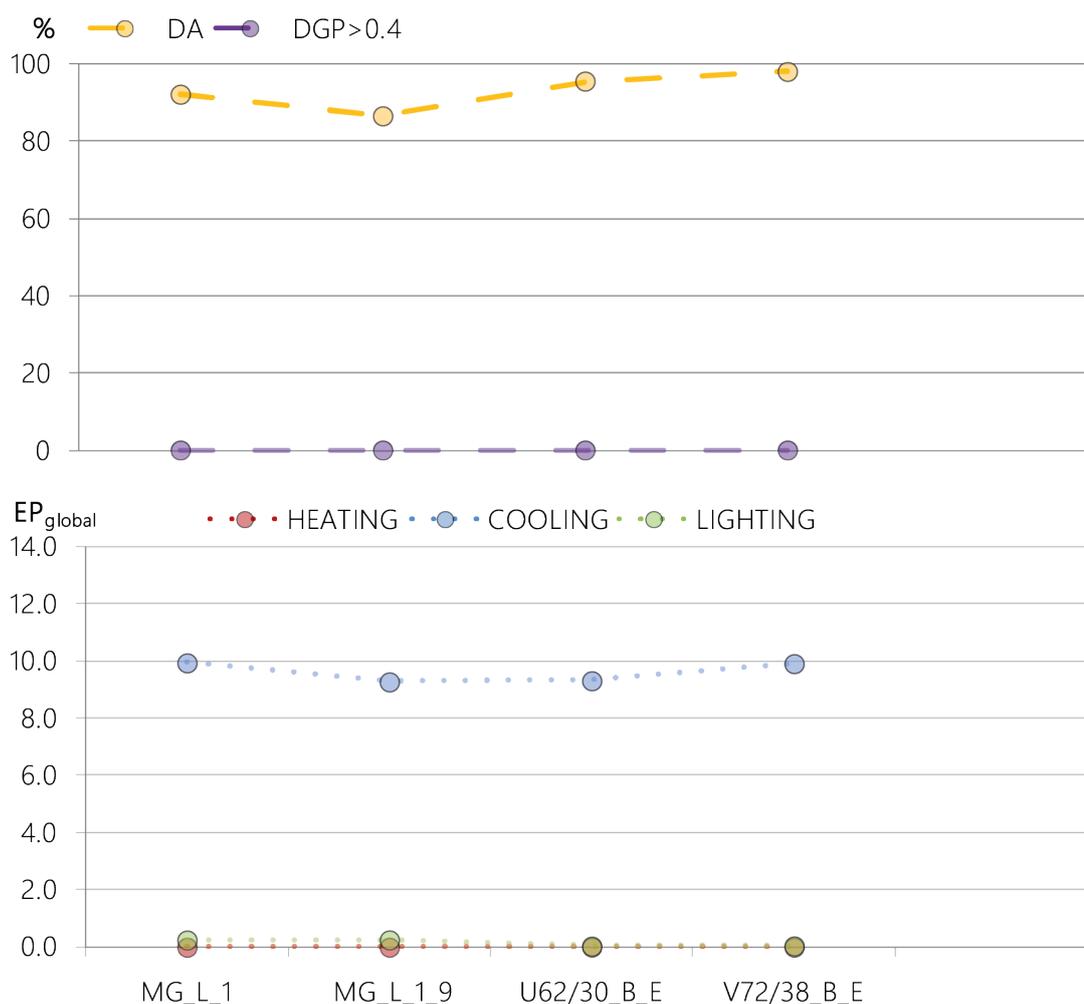


ON/OFF	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
ML_1	17.4%	0.0%	0.0	7.5	1.2	8.7	8.7
ML_6	59.3%	0.0%	0.0	8.1	0.2	8.3	8.2

#### 4.4.3 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO LINEARE E CON VENEZIANE

Anche in questo caso vengono selezionate due strategie lineari dando priorità rispettivamente a obiettivi visivi ed energetici. Le veneziane considerate per le altre strategie sono esterne al componente finestrato.

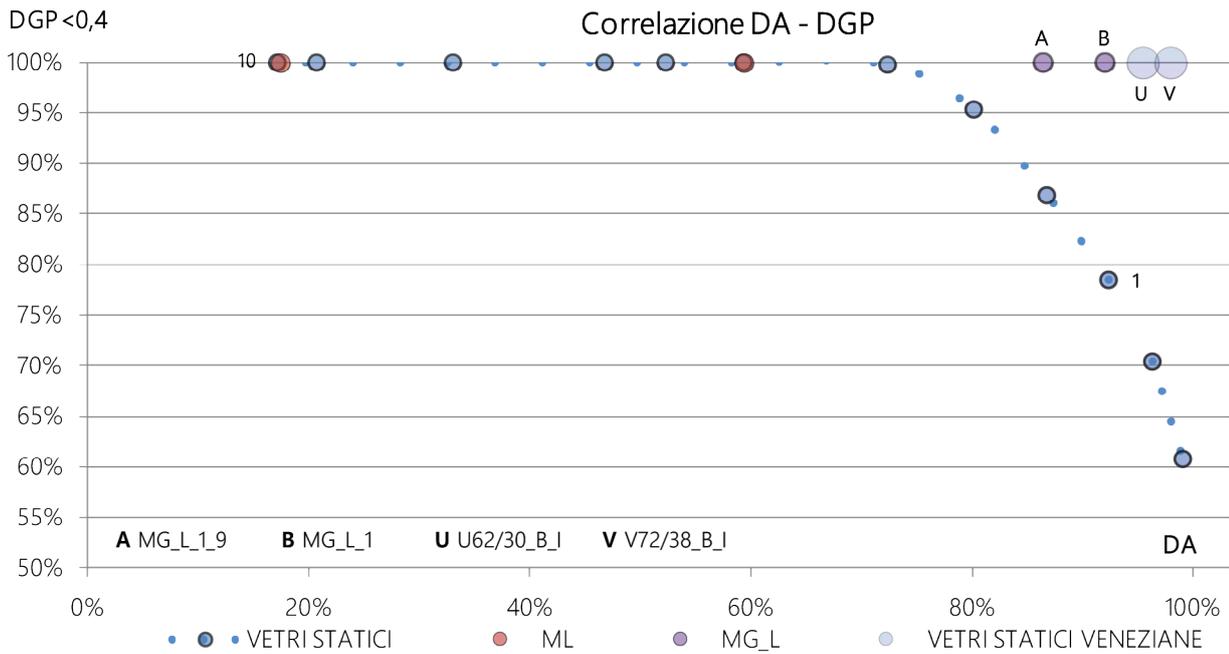
**MG\_L\_1\_9:** strategia in cui lo stadio 9 (appena colorato) viene utilizzato come stadio limite per la trasparenza, con l'obiettivo di ridurre il fabbisogno per raffrescamento senza incidere sull'illuminazione naturale. Allo stesso tempo al termine del periodo di occupazione il vetro elettrocromico viene settato allo stadio di massima colorazione.



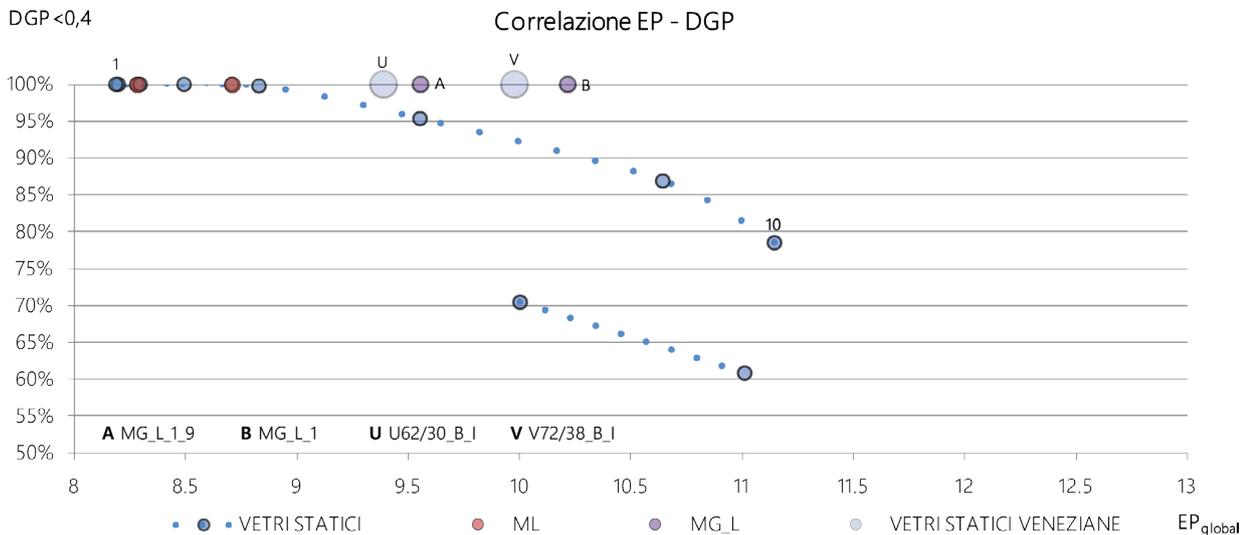
LINEARI	DA	DGP > 0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL
MG_L_1	92.0%	0.0%	0.0	10.0	0.3	10.2
MG_L_1_9	86.4%	0.0%	0.0	9.3	0.3	9.6
U62/30_B_E	95%	0.0%	0.0	9.3	0.0	9.4
V72/38_B_E	98%	0.0%	0.0	9.9	0.0	10.0

Tutti i casi presentati eliminano completamente il problema dell'abbagliamento mantenendo ottime prestazioni sul campo dell'illuminazione naturale e buone prestazioni energetiche. I risultati sono molto simili, ad eccezione dei livelli di DA, che dove vengono utilizzate le veneziane risultano decisamente più alti.

#### 4.4.5 ANALISI CRITICA DEI RISULTATI OTTENUTI



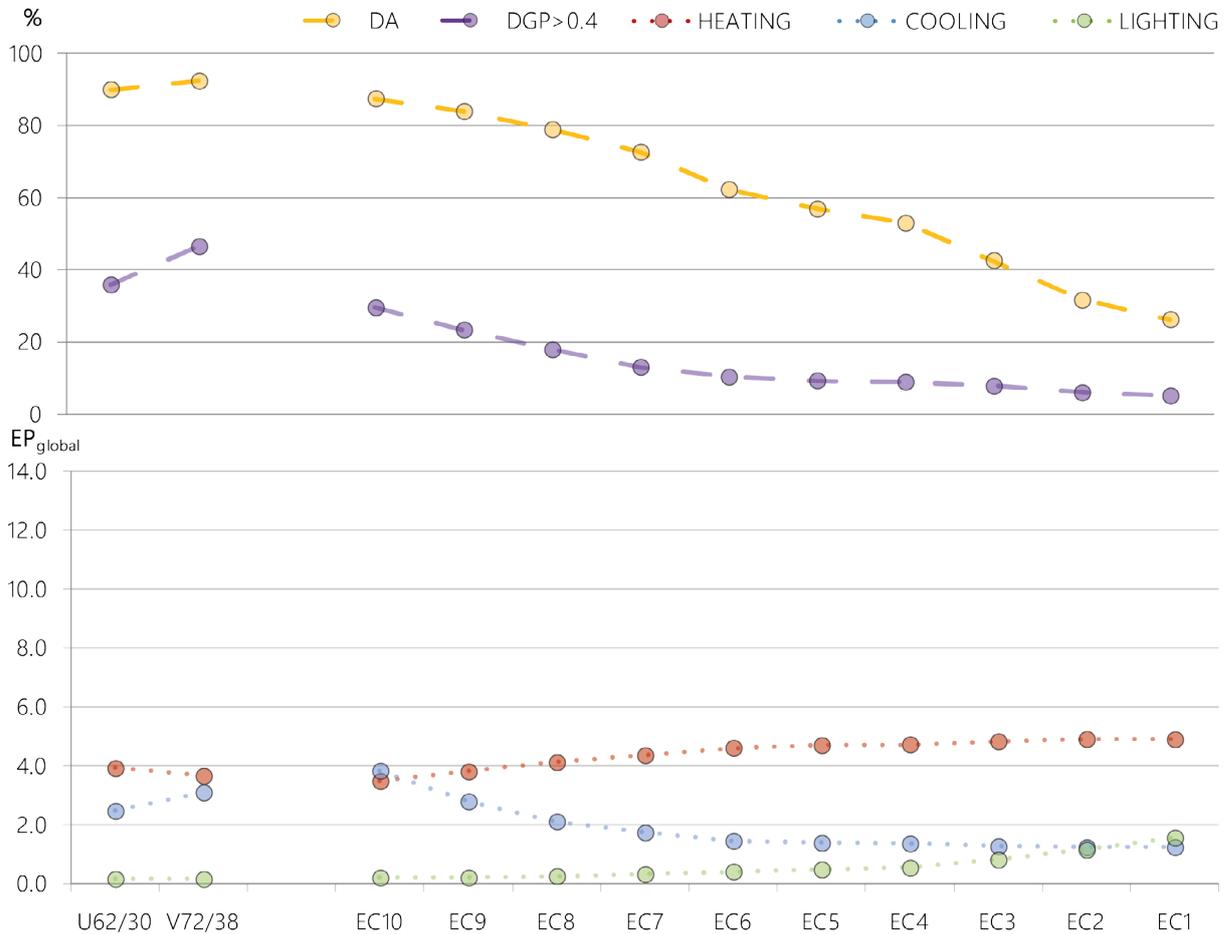
Com'è già stato sottolineato nel caso di Abu Dhabi la tecnologia elettrocromica e quella delle veneziane sono comparabili per prestazioni energetiche e visive. Tale risultato dipende strettamente dall'orientamento della facciata considerata, che in questo caso elimina il problema dell'abbagliamento diretto. Orientare la facciata a Est o ad Ovest può dare spazio ad ulteriori interessanti valutazioni.



## 4.5 ANALISI EFFETTUATE SU ROMA \_ WWR 1

Sono di seguito presentati i risultati visivi e termici delle analisi condotte nella città di Roma, considerando l'ufficio con facciata totalmente vetrata esposta a Sud.

### 4.5.1 ANALISI SU VETRI STATICI



	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
U62/30	90.0%	35.9%	3.9	2.5	0.2	6.6	2.6
V72/38	92.4%	46.5%	3.7	3.1	0.2	6.9	3.3
EC10	87.5%	29.5%	3.5	3.8	0.2	7.5	4.0
EC9	84.0%	23.4%	3.8	2.8	0.2	6.8	3.0
EC8	79.0%	17.9%	4.1	2.1	0.3	6.5	2.4
EC7	72.7%	13.1%	4.4	1.7	0.3	6.4	2.1
EC6	62.3%	10.3%	4.6	1.5	0.4	6.5	1.9
EC5	56.9%	9.3%	4.7	1.4	0.5	6.6	1.9
EC4	53.0%	8.9%	4.7	1.4	0.5	6.7	1.9
EC3	42.6%	7.8%	4.8	1.3	0.8	6.9	2.1
EC2	31.7%	6.0%	4.9	1.2	1.2	7.3	2.4
EC1	26.3%	5.1%	4.9	1.2	1.6	7.7	2.8

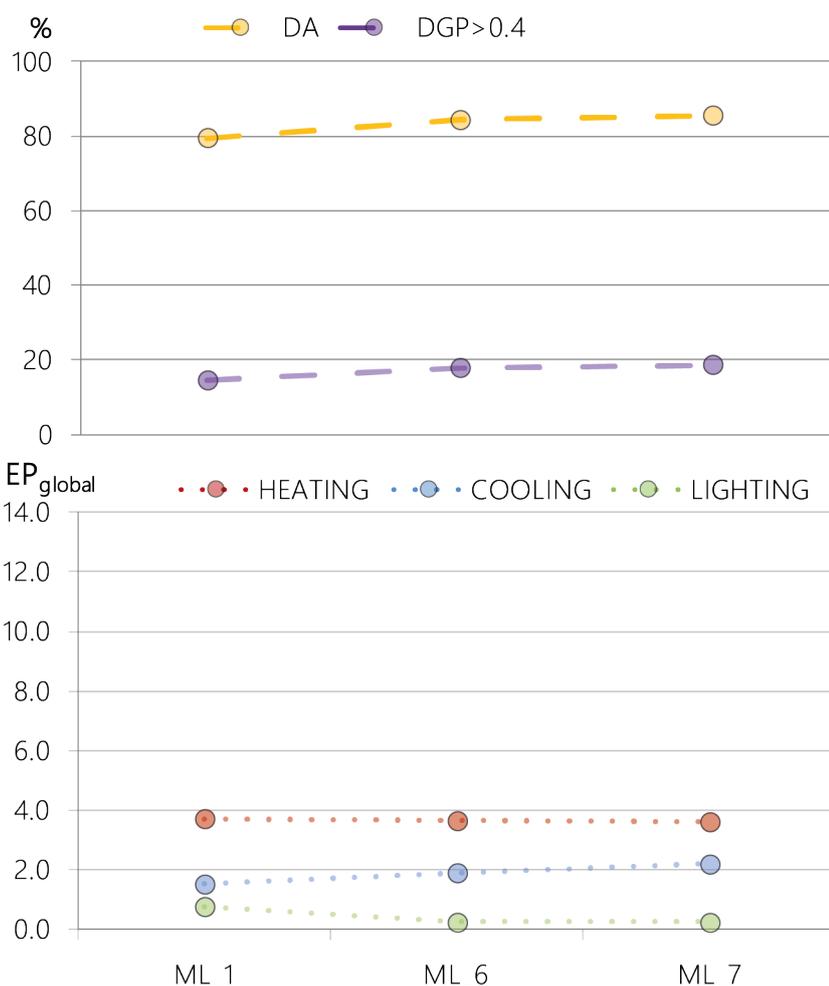
Anche nel caso di Roma lo stadio 6 del vetro elettrocromico si presenta come stadio nodale oltre

cui diversi parametri tendono a stabilizzarsi, e di nuovo risulta lo stadio che minimizza la richiesta energetica per raffrescamento e illuminazione. I dispendi per riscaldamento e raffrescamento nei vetri chiari assumono valori prossimi, condizione ottimale per l'efficacia di un vetro dinamico. Inoltre nei vetri chiari si registra un altissimo rischio di abbagliamento ( $DGP > 0,4 = 36,47\%$ ), che si riduce fino al 5% con lo stato limite di colorazione EC.

Alcune delle colorazioni dell'elettrocromico risultano di per sé già migliorative in abbagliamento e consumo energetico rispetto ai riferimenti selettivi.

#### 4.5.2 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO ON/OFF

Vengono esaminate le tre strategie di minimizzazione dei carichi termici utilizzando gli stadi limite 1, 6, 7.



ON/OFF	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
ML_1	79.5%	14.5%	3.7	1.5	0.8	6.0	2.3
ML_6	84.3%	17.9%	3.7	1.9	0.2	5.8	2.1
ML_7	85.5%	18.7%	3.6	2.2	0.2	6.1	2.4

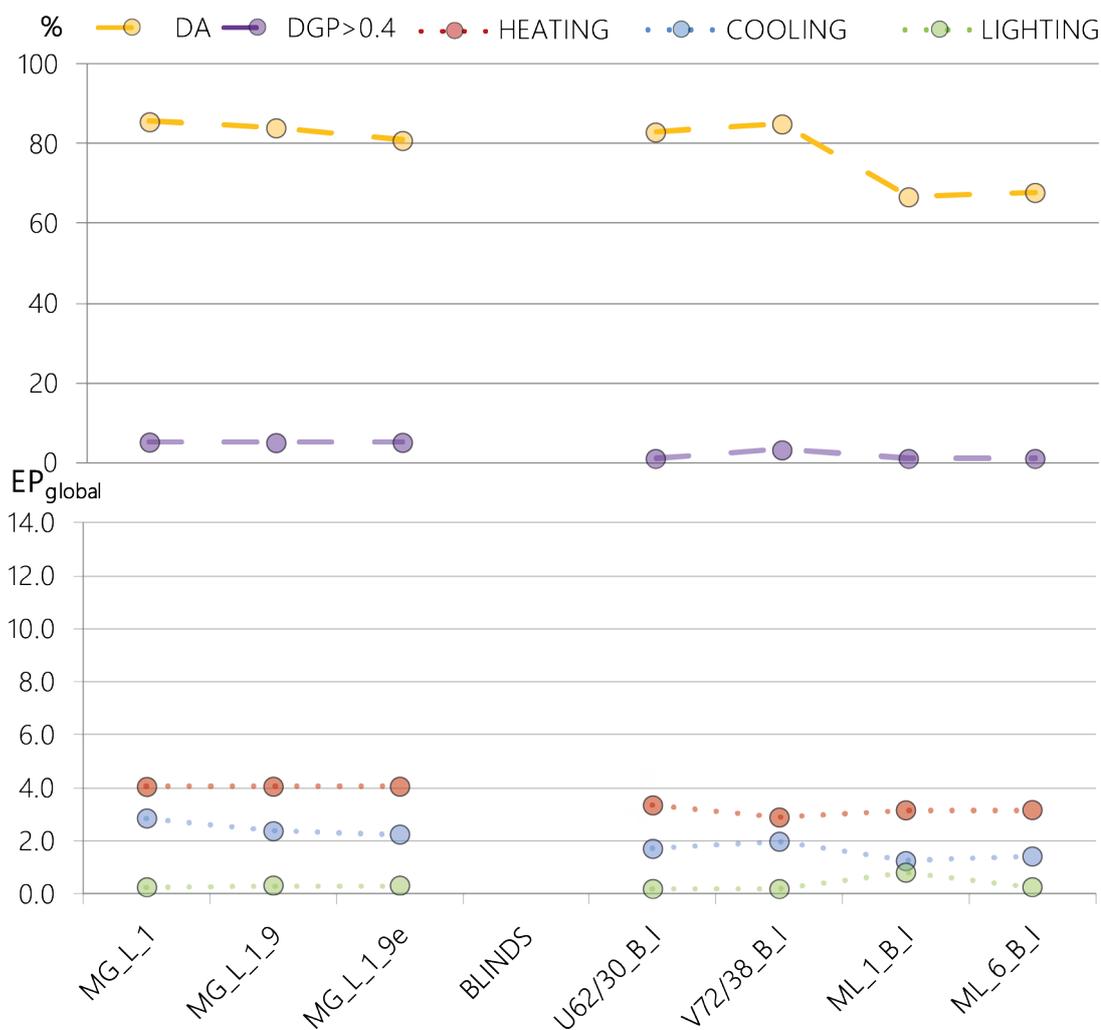
Tale tipo di controllo porta a un'efficace riduzione di fabbisogno energetico mantenendo un buon livello di illuminazione naturale. Il rischio di abbagliamento viene ridotto, ma risulta ancora superiore ai livelli soddisfacenti (da 14 a 19%).

### 4.5.3 ANALISI BASATE SU STRATEGIE DI CONTROLLO LINEARE E CON VENEZIANE

Vengono analizzate due strategie lineari oltre alla strategia base per la riduzione del DGP:

**MG\_L\_1\_9:** in presenza di un carico di raffrescamento il vetro viene settato allo stadio 9

**MG\_L\_1\_9e:** nel periodo estivo lo stato limite di trasparenza rimane il 9 (stadio appena successivo alla completa trasparenza). Nel periodo estivo, quando non c'è occupazione, il vetro viene settato allo stadio di massima colorazione.



LINEARI	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL	C+L
MG_L_1	85.7%	5.3%	4.0	2.9	0.3	7.1	3.1
MG_L_1_9	84.1%	5.1%	4.0	2.4	0.3	6.7	2.7
MG_L_1_9e	81%	5.2%	4.0	2.2	0.3	6.6	2.6
BLINDS							C+L
U62/30_B_I	83%	1.2%	3.3	1.7	0.2	5.2	1.9
V72/38_B_I	85.1%	3.3%	2.9	2.0	0.2	5.0	2.2
ML_1_B_I	67%	1.2%	3.2	1.2	0.8	5.2	2.0
ML_6_B_I	68%	1.2%	3.2	1.4	0.3	4.8	1.7

La performance visiva delle strategie lineari dell'elettrocromico risulta ottima: l'indice DGP>0,4 viene ridotto al 5% e la DA rimane in tutti i casi superiore all'80%. La prestazione energetica risul-

ta molto simile a quella dei riferimenti; in alcuni casi minore o pari (soprattutto rispetto al vetro selettivo Vision 72 e allo stadio 10), in altri maggiore (rispetto al vetro selettivo Ultra 60 T e agli stadi appena inferiori al 10).

Tuttavia ancora una volta è l'utilizzo delle veneziane che permette di arrivare a risultati eccellenti in tutte e tre le direzioni: per i vetri selettivi si arriva alla quasi totale eliminazione del rischio di abbagliamento mantenendo una DA sempre maggiore dell'80% e un consumo energetico decisamente inferiore rispetto alla base statica ( $EP_{V72/38\_B\_I} = 5,0 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ;  $EP_{V72/38} = 6,9 \text{ kWh/m}^2\text{y}$ ). L'accoppiamento della strategia elettrocromica per la minimizzazione dei carichi e l'utilizzo delle veneziane per eliminare l'abbagliamento porta ai migliori risultati energetici e di abbagliamento assoluti, mantenendo una DA vicina al 70%.

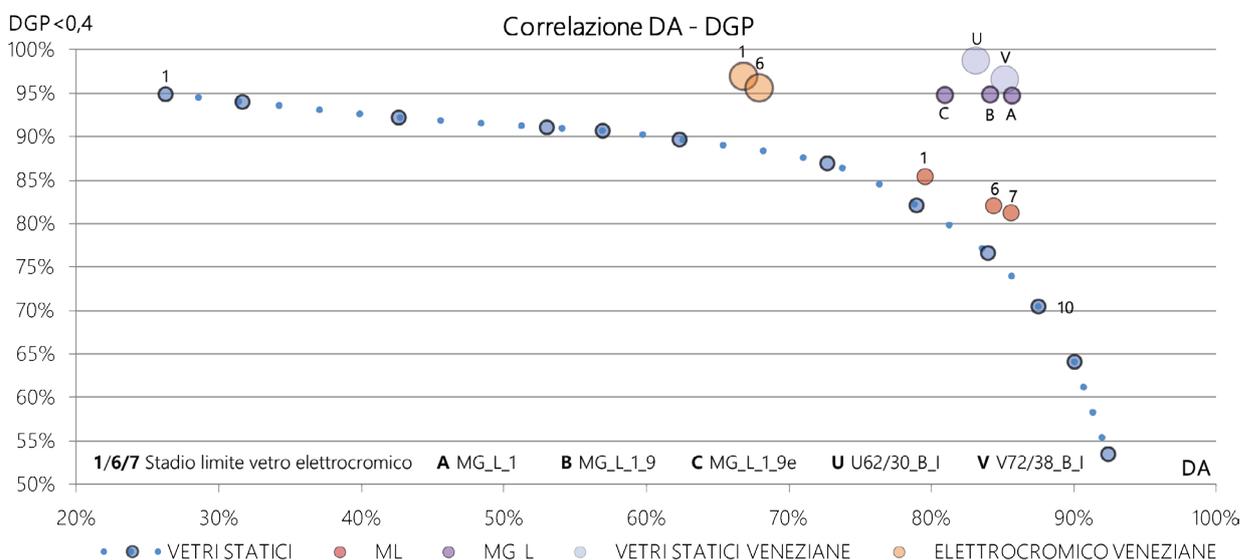
#### 4.5.4 ANALISI CRITICA DEI RISULTATI OTTENUTI



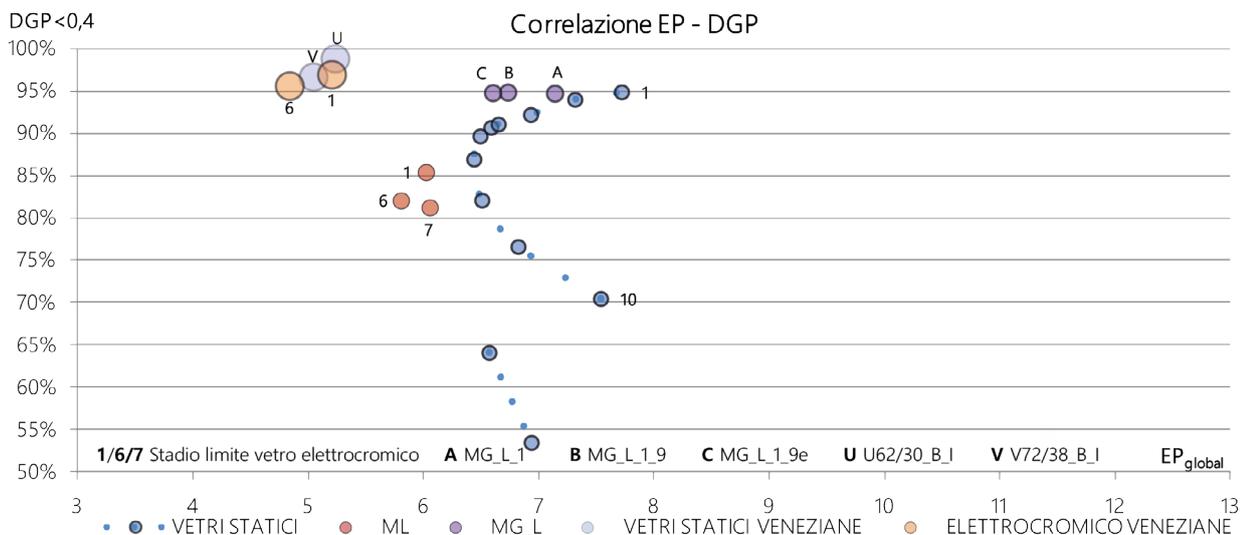
Le prestazioni energetiche raggiunte dalle strategie di minimizzazione dei carichi termici -che in assenza di veneziane mantengono un buon livello di DA, ma un alto rischio di abbagliamento- con l'utilizzo delle veneziane eliminano quasi del tutto il rischio di abbagliamento sacrificando l'illuminazione naturale. In questa direzione il controllo dei vetri selettivi con le veneziane risulta maggiormente efficace, raggiungendo ottimi livelli in tutti e tre i campi. Mantenendo lo stesso fabbisogno energetico dei vetri selettivi e quasi lo stesso livello di illuminazione è possibile abbattere il rischio di abbagliamento mediante l'utilizzo di una strategia lineare basata su DGP.

STRATEGIA	DA	DGP>0.4	HEATING	COOLING	LIGHTING	GLOBAL
U62/30	90.0%	35.9%	3.9	2.5	0.2	6.6
V72/38	92.4%	46.5%	3.7	3.1	0.2	6.9
<b>STRATEGIE ON OFF</b>						
ML_1	79.5%	14.5%	3.7	1.5	0.8	6.0
ML_6	84.3%	17.9%	3.7	1.9	0.2	5.8
ML_7	85.5%	18.7%	3.6	2.2	0.2	6.1
<b>STRATEGIE LINEARI</b>						
MG_L_1	85.7%	5.3%	4.0	2.9	0.3	7.1
MG_L_1_9	84.1%	5.1%	4.0	2.4	0.3	6.7
MG_L_1_9e	80.9%	5.2%	4.0	2.2	0.3	6.6
<b>BLINDS</b>						
U62/30_B_I	83%	1.2%	3.3	1.7	0.2	5.2
V72/38_B_I	85.1%	3.3%	2.9	2.0	0.2	5.0
ML_1_B_I	67%	1.2%	3.2	1.2	0.8	5.2
ML_6_B_I	68%	1.2%	3.2	1.4	0.3	4.8

Dal punto di vista visivo tutte le strategie risultano migliorative rispetto alla curva descritta dai vetri statici. Vi è tuttavia una grande distinzione tra i livelli di illuminazione naturale raggiunti da esse. A differenza dei casi delle altre città prima esaminati in questo caso le strategie di minimizzazione dei carichi termici risultano di per sè più efficaci rispetto ai vetri statici chiari, ma non si discostano nettamente dalle prestazioni di vetri statici con colorazione intermedia (si registra solamente un miglioramento sul lato dell'abbagliamento). Osservando il grafico sottostante comprendiamo che esiste però un significativo miglioramento sul lato energetico. Le strategie che comprendono l'utilizzo delle veneziane si comportano in maniera ottima considerando i parametri di energia e abbagliamento, ma è possibile leggere la rilevante differenza a livello di illuminazione naturale sul grafico sottostante.



Le strategie lineari sono efficaci per comfort visivo, ma non altrettanto dal punto di vista energetico. Rispetto a un vetro colorato hanno il vantaggio di abbattere l'abbagliamento mantenendo un livello di illuminazione maggiore di più della metà dei casi presentati in grafico.



### Indicatori di medie dimensioni

**ML\_1:** Minimizzazione dei carichi termici. Vetro elettrocromico settato allo stato di massima trasparenza (**EC 10**) in presenza di un carico di riscaldamento; stato di massima colorazione (**EC 1**) in presenza di un carico di raffrescamento.

**ML\_6:** Minimizzazione dei carichi termici. Vetro elettrocromico settato alla massima trasparenza (**EC 10**) in presenza di un carico di riscaldamento; colorazione intermedia (**EC 6**) in presenza di un carico di raffrescamento.

**ML\_7:** Minimizzazione dei carichi termici. Vetro elettrocromico settato alla massima trasparenza (**EC 10**) in presenza di un carico di riscaldamento; colorazione intermedia (**EC 7**) in presenza di un carico di raffrescamento.

**MG\_L\_1:** Ogni volta che la soglia 0,4 viene superata il vetro compie uno switch verso lo stadio con colorazione appena più intensa a quello in cui si trova.

**MG\_L\_1\_9:** come **MG\_L\_1**; in presenza di un carico di raffrescamento il vetro elettrocromico viene settato alla stadio 9.

**MG\_L\_9e:** come **MG\_L\_1\_9**; stadio limite di trasparenza del vetro elettrocromico in periodo estivo (tra 15/06 e 15/09) = 9; nello stesso intervallo stadio 1 quando non c'è occupazione.

### Indicatori di grandi dimensioni: veneziane

**U62/30\_B\_I:** Minimizzazione abbagliamento con veneziana interna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°) con vetro **U62/30**. Con DGP > 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

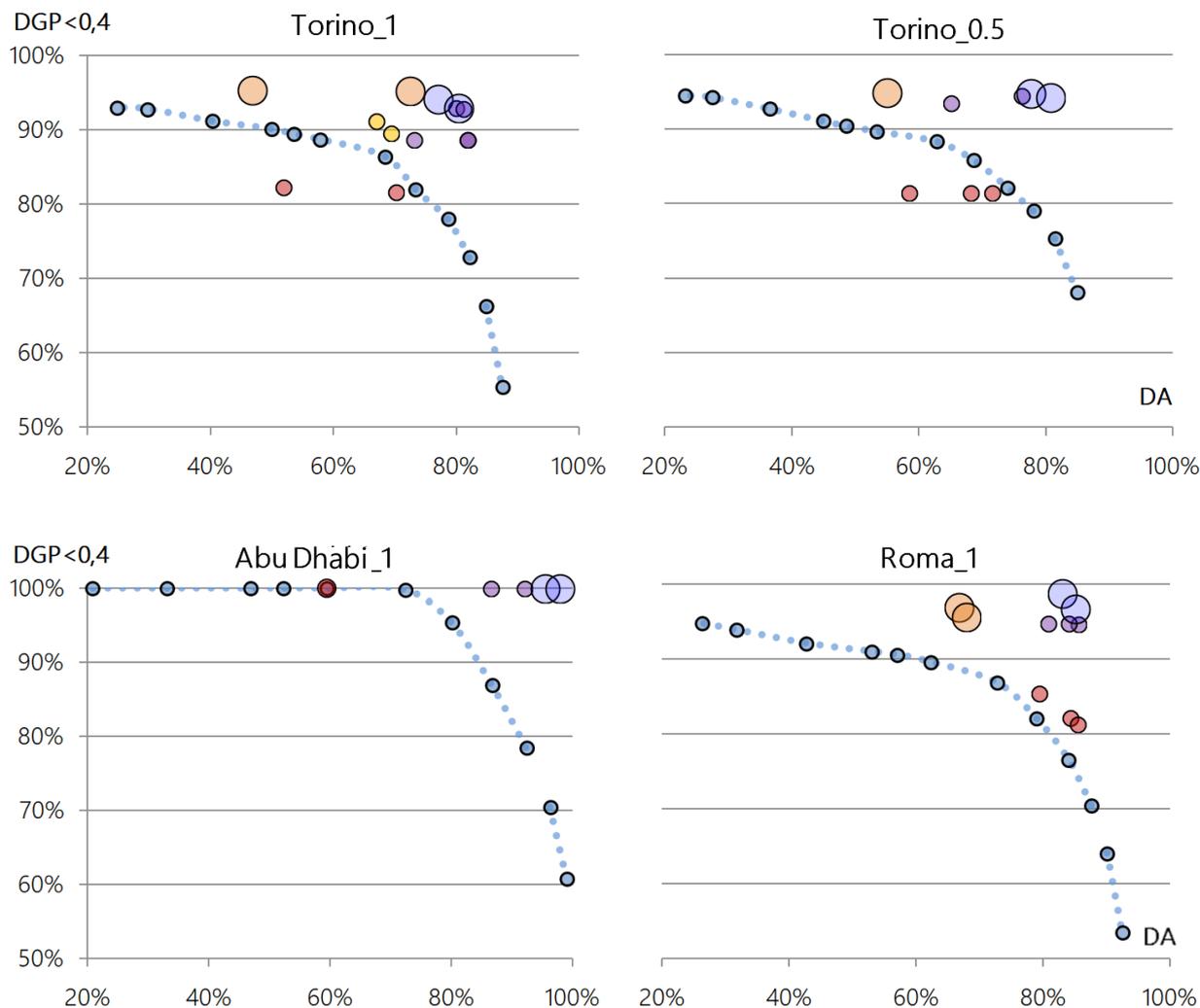
**V72/38\_B\_I:** Come **U62/30\_B\_I**; vetro **V72/38**.

**ML\_1\_B\_I:** Vetro elettrocromico. Minimizzazione dei carichi termici con regolazione 10-1; minimizzazione abbagliamento con veneziana interna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°). Con DGP > 0,4 il sistema regola le veneziane sull'inclinazione necessaria a riportare il valore sotto la soglia.

**ML\_6\_B\_I:** Come **ML\_1\_B\_I**; Minimizzazione dei carichi termici con regolazione 10-6.

## 4.6 CONFRONTO TRA CITTÀ

### DGP -DA



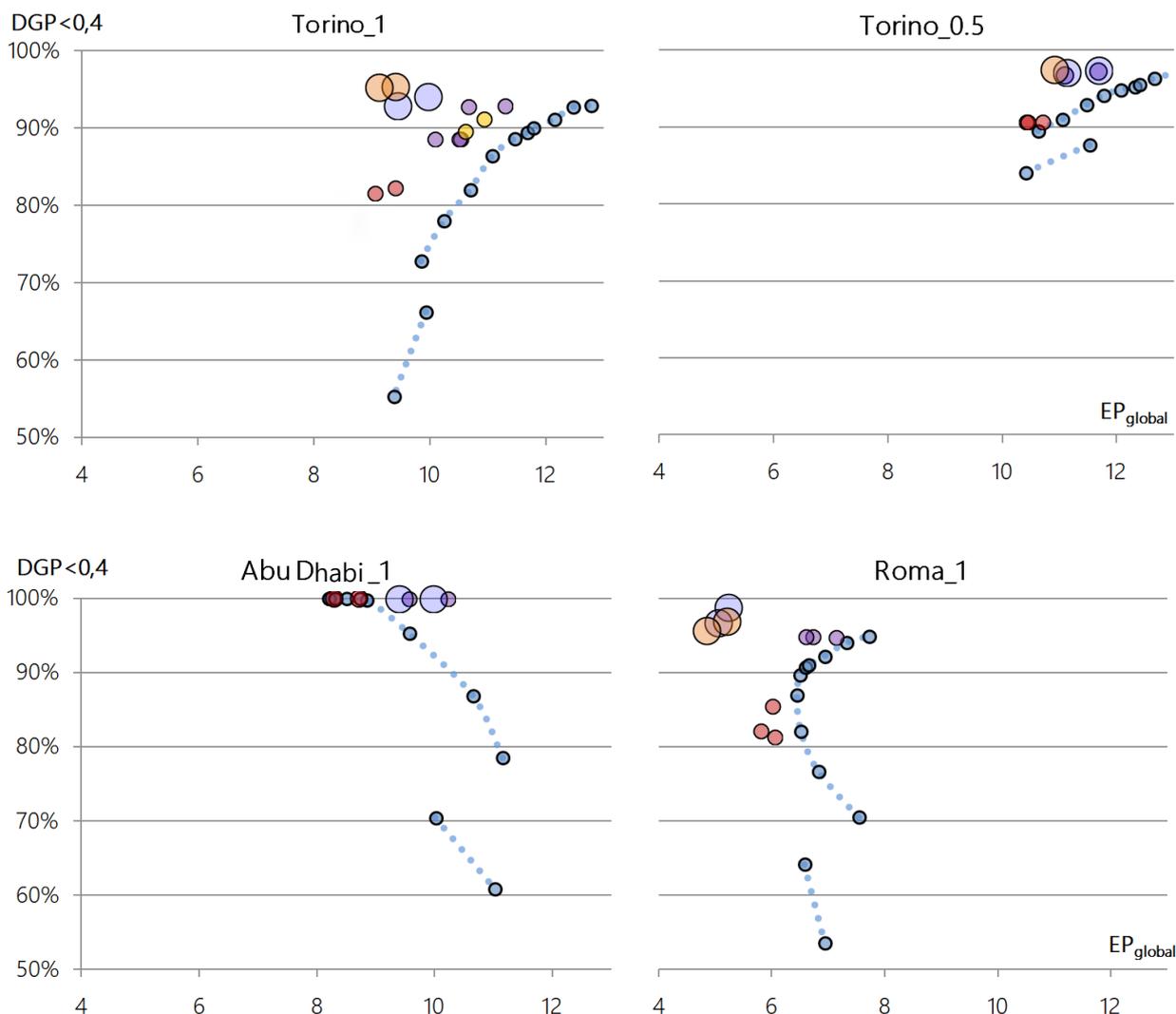
Confrontando i risultati i Torino si nota come il cambiamento di WWR non modifichi la posizione dei punti sul grafico, ma implichi una notevole variazione solo nelle strategie lineari elettrocromiche rispetto al rischio di abbagliamento e nelle strategie di minimizzazione dei carichi termici rispetto alla DA. Infatti, diversamente da quanto ci si potrebbe aspettare, il modello con la finestra di dimensioni minori presenta valori di DA più alti. Non è così per le finestre statiche, dunque tale elemento è dovuto alla diminuzione degli apporti solari, che implica la riduzione del fabbisogno di raffrescamento e dunque una minore percentuale di timestep in cui il vetro viene settato allo stadio limite di colorazione. Questo permette un maggiore passaggio di luce in ambiente.

A Torino le strategie di minimizzazione dei carichi termici si trovano nella parte interna e dunque meno performante della curva descritta dai vetri statici; nel caso di Roma passano nella parte esterna, grazie a un minimo miglioramento dei parametri di DGP, ma soprattutto all'aumento della DA, probabilmente dovuto alla maggiore quantità di luce entrante (per fattori fisici e meteorologici). Gli indici di DA infatti migliorano in tutti i casi sia per Roma che per Abu Dhabi in confronto a Torino. In queste due città le strategie lineari elettrocromiche si avvicinano come prestazione a quelle dei vetri selettivi con veneziane: nel caso Torinese questo accade solo per quelle che comportano maggiori dispendi energetici.

Notiamo inoltre che man mano che si scende di latitudine diminuisce il rischio abbagliamento poiché il sole compie un percorso più alto nel cielo.

La possibilità di risoluzione dell'abbagliamento con la tecnologia elettrocromica è indice della quantità di abbagliamento dovuto a sole diretto (non risolubile) e dovuto a contrasto (risolvibile).

### DGP -EP<sub>global</sub>



Dall'esame dei grafici soprastanti si può identificare un'interessante variazione della curva dei riferimenti: nel caso Torino\_1 (città con fabbisogno di riscaldamento predominante) la graduale colorazione del vetro causa un aumento del fabbisogno energetico globale. Nel caso di Abu Dhabi (città con fabbisogno di raffrescamento predominante) la curva invece inverte la sua pendenza: più il vetro si scurisce minore sarà il fabbisogno energetico globale. Nel caso Romano, dove c'è equilibrio tra fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, la curva assume un andamento particolare, dove i vetri più trasparenti e quelli più colorati portano a maggiori dispendi, mentre le colorazioni intermedie minimizzano il fabbisogno energetico globale. Il vetro elettrocromico dimostra maggiore efficacia in quest'ultimo caso, dove i vantaggi della dinamicità possono essere sfruttati appieno. Comunque tutte le strategie considerate migliorano le prestazioni dei vetri statici per almeno un parametro.

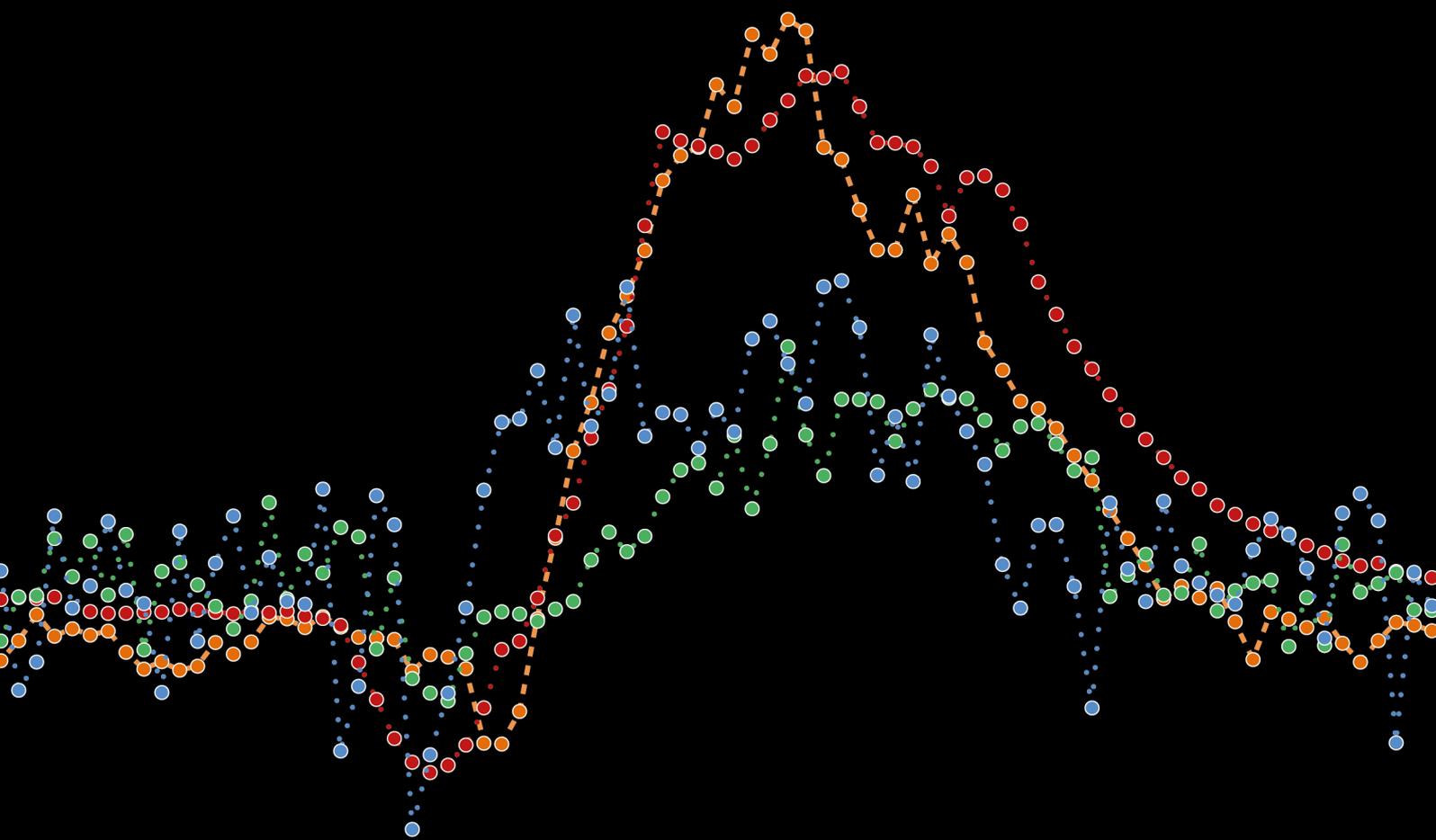
Esaminando i casi relativi alla città di Torino si può vedere come nel caso con  $WWR=0.5$  le prestazioni delle strategie lineari elettrocromiche e quelle dei vetri selettivi con veneziane siano quasi identiche, anche se non le migliori, mentre nel caso con  $WWR=1$  i vetri selettivi risultano considerevolmente più efficaci. Da questo consegue che nella specifica città di Torino un vetro elettrocromico montato su una finestra di medie dimensioni è assolutamente comparabile con la prestazione ottenibile tramite dei vetri selettivi con veneziane, mentre nel caso a tutta facciata questi ultimi superano in uno o più parametri il vetro dinamico.

A livello generale comunque, osservando lo spostamento dei punti verso sinistra nei grafici, si può dunque assumere che il vetro elettrocromico sia maggiormente efficace quando occupa grandi superfici trasparenti.



## CAPITOLO 5

## CONCLUSIONI



Obiettivo della tesi è stata la valutazione sperimentale e mediante simulazioni numeriche di un sistema vetrato composto da: - lastra elettrocromica ( $T_{v\_max}=55\%$ ,  $g_{max}=39\%$ ;  $T_{v\_min}=7\%$ ,  $g_{min}=8\%$ ) di spessore 9 mm; - camera con Argon al 90% di spessore 15 mm; - lastra interna con rivestimento basso-emissivo.

Grazie alle sperimentazioni sull'appara sperimentale presente al Politecnico di Torino è stato possibile caratterizzare il sistema vetrato identificandone i valori di Conduttanza, Trasmittanza, Fattore Solare, Trasmissione Solare e Trasmissione visibile. Inoltre è stato possibile valutare l'influenza delle condizioni climatiche esterne sulla prestazione del sistema vetrato elettrocromico e di un ulteriore sistema con lastra esterna termocromica.

I dati sperimentali raccolti hanno permesso l'avanzamento di alcune ipotesi dal punto di vista del comfort termico: poiché le temperature superficiali interne dei sistemi cromogenici risultano inferiori a quelle del sistema statico vetrocamera chiaro + basso-emissivo preso come riferimento è ragionevole ipotizzare che tali tipi di sistema possano avere effetti positivi sul livello di comfort termico dell'occupante. Questo specifico tema non è però stato oggetto di trattazione.

Passo successivo è stata l'implementazione di un modello di simulazione prendendo come ambiente di esame un ufficio di dimensioni standard (3,6\*4,5\*2,7 m) con facciata trasparente esposta a Sud localizzato in Torino, Roma, Abu Dhabi, e con diversi rapporti *Window to Wall* (1 e 0,5).

La validazione di tale modello è stata effettuata a livello termico mediante il confronto tra i dati puntuali misurati sperimentalmente e quelli estratti dalle simulazioni in giornate simili.

Sono stati identificati alcuni sistemi trasparenti statici di riferimento, quali due vetri selettivi ad alte prestazioni e i diversi stati di colorazione del vetro elettrocromico, corrispondenti a sistemi vetrati con lastra esterna colorata con diverse intensità. Successivamente si è proceduto con l'analisi termica e visiva delle prestazioni dei riferimenti e di alcune strategie di base attestate in letteratura, tra cui strategie on/off, strategie lineari e strategie che comprendono l'utilizzo delle veneziane. Grazie all'osservazione dei risultati ottenuti è stato possibile sviluppare le strategie primarie ed esaminare la variazione dei parametri visivi ed energetici conseguenti. I tre parametri principali analizzati sono stati il fabbisogno energetico globale in energia primaria, la Daylight Autonomy e il rischio di abbagliamento tramite valutazione del DGP.

Dai risultati analizzati e precedentemente presentati si possono trarre alcune generali conclusioni:

- 1) L'efficacia del sistema elettrocromico dipende strettamente dalle condizioni al contorno, quali la localizzazione, il clima, l'orientamento e l'orizzonte (osservazione derivante dalle campagne sperimentali effettuate). La variazione di tali condizioni implica una notevole variazione dei risultati. La strategia di controllo ottimale per un dato sito è indissolubilmente legata alle sue caratteristiche: tra le strategie analizzate alcune tra le più performanti sono state studiate ad hoc.
- 2) Il miglioramento di uno dei parametri prima citati compromette necessariamente il peggioramento di un altro: l'aumento dell'illuminazione naturale è in contrasto con la riduzione del rischio di abbagliamento, così come quest'ultimo è in contrasto con la minimizzazione energetica invernale, pur risultando in accordo con la minimizzazione energetica estiva.

3) In generale si osserva che l'utilizzo di un vetro dinamico, così come il controllo tramite l'utilizzo delle veneziane è sempre migliorativo almeno su uno o più parametri analizzati. Il parametro che viene sempre penalizzato rispetto ai riferimenti statici è l'illuminazione naturale interna, dato tuttavia non oggettivo, perché non tiene conto dell'azione umana nel confronto di elementi disturbanti come l'abbagliamento, azione che implica una necessaria modificazione dei risultati.

La scelta di una strategia di controllo e la valutazione dei risultati a cui essa porta dipende strettamente da quale obiettivo si pone come gerarchicamente primario. È possibile tuttavia elaborare alcune riflessioni generali.

- 1) L'utilizzo di una strategia di controllo lineare del vetro elettrocromico basata sul rischio di abbagliamento permette di raggiungere risultati energetici e visivi accettabili evitando l'installazione di veneziane interne o esterne. Di norma tali strategie risultano maggiormente dispendiose dal punto di vista energetico, ma hanno come vantaggio il mantenimento del contatto visivo con l'esterno. Tuttavia per l'applicazione di tali strategie occorre costruire un modello di simulazione, poiché è stato verificato che il controllo basato sull'illuminamento non risulta soddisfacente.
- 2) L'efficacia di un sistema dinamico elettrocromico aumenta con l'aumentare del rapporto WWR e dunque della superficie vetrata. Non sempre tale aumento di superficie disperdente risulta peggiorativa nei risultati energetici finali.
- 3) Inoltre maggiore è l'equilibrio tra fabbisogno di riscaldamento e fabbisogno di raffrescamento in un dato sito, maggiore è la prestazione del sistema elettrocromico e lo scarto rispetto agli altri sistemi.
- 4) Infine nella valutazione del fabbisogno energetico di un ambiente o di un edificio dove il componente trasparente è controllato nello stesso modo è essenziale minimizzare la somma della domanda energetica di raffrescamento e di illuminazione.
- 5) Come anche viene sottolineato dalla letteratura le strategie più convenienti considerano una molteplicità di fattori di input e sono costruite secondo alberi decisionali. L'attuale ricerca si concentra sull'elaborazione di modelli predittivi e sulla discretizzazione geometrica della facciata, in modo da poter controllare l'abbagliamento con superfici di area contenuta, controllando il resto della facciata in base alla minimizzazione dei carichi termici.

A livello compositivo e architettonico l'utilizzo di tale tipo di tecnologia risulta avere un impatto non indifferente: dove le tecnologie statiche impongono la presenza di un sistema di oscuramento interno o esterno il vetro elettrocromico permette, a determinate condizioni, di sottrarsi a tale necessità senza compromettere in modo eccessivo le prestazioni visive ed energetiche. Una delle conseguenze macroscopiche di tale opportunità riguarda il mantenimento del contatto visivo con l'esterno, e la possibilità di incrementare la qualità dell'ambiente offrendo nuove occasioni di disegno e progettazione degli ambienti interni ed esterni basati sull'utilizzo dei colori e sulla loro dinamicità.

## BIBLIOGRAFIA

### Capitoli 1-2

Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici Conclusa a New York il 9 maggio 1992, art.2

Conclusioni della presidenza del Consiglio Europeo di Bruxelles dell'8-9 marzo 2007, 7224/07

Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia, [2010] G.U. L 153/13

Ellika Taveres-Cachat, Steinar Grynning, Oddvar Almas, Francesco Goia, *Advanced transparent facades- market available products and associated challenges in building performance simulation*, Energy Procedia, Volume 132, 2017, Pages 496-501

Wei Wu, Harrison M. Skye, Piotr A. Domanski, *Selecting HVAC systems to achieve comfortable and cost-effective residential net-zero energy buildings*, in "Applied Energy", volume 212, 15 Febbraio 2018, pagg 577-591

Paula van den Brom, Arjen Meijer and Henk Visscher, *Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics*, in "Building Research & Information", Volume 46, 2018, pagg 54-70

Igor Sartori, Assunta Napolitano, Karsten Voss, *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*, in "Energy and Buildings", Volume 48, Maggio 2012, pagg 220-232

Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout, *A review on buildings energy consumption information*, in "Energy and Buildings", Volume 40, Issue 3, 2008, Pagg 394-398

Norma UNI/TS 11300-1, Ottobre 2014

Fabio Favoino, Mauro Overend, Qian Jin, *The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies*, in "Applied Energy", Volume 156, 5 Ottobre 2015, Pages

E. Taveres-Cachat, S. Grynning, O. Almas, F. Goia, *Advanced transparent facades- market available products and associated challenges in building performance simulation*, in "Energy Procedia", Volume 132, 2017, Pages 496-501

Karam M. Al-Obaidi, Mazran Ismail & Abdul Malek Abdul Rahman, *A Review of Skylight Glazing Materials in Architectural Designs for a Better Indoor Environment*, in "Modern Applied Science", Volume 8, Issue 1, 2014, Pagg 68-82

Snehashis Ghoshal, Subhasis Neogi, *Advance Glazing System – Energy Efficiency Approach for Buildings a Review*, in "Energy Procedia", Volume 54, 2014, Pagg 352-358

Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, Seeram Ramakrishna, *A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment*, in "Solar Energy Materials and Solar Cells" Volume 159, 1 Gennaio 2017,

Jan Wienold, *Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis*, in Conference of the International-Building-Performance-Simulation-Association 10, 2007, Beijing

Tin-tai Chown, Chunying Li, Zhang Lin, *Innovative solar windows for cooling-demand climate*, in "Solar Energy Materials and Solar Cells", Volume 94, Issue 2, Febbraio 2010, pagg

Simone Iannarella, *Vetri ad alto isolamento e controllo solare*, in "Responsive transparent building envelopes", p 25

N. Safer, M. Woloszyn, J.J. Roux, *Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin façade equipped with a venetian blind*, in "Sol Energy", volume 79, 2005, pp. 193-203

Ali Ghaffarianhoseini, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Umberto Berardi, John Tookey, Danny Hin Wa Li, Shahab Kariminia, *Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs)*, in "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Volume 60, Luglio 2016, Pages 1052-1065

Hong Ye, Xianchun Meng, Linshuang Long, Bin Xu, *The route to a perfect window*, in "Renewable Energy", Volume 55, Luglio 2013, pagg

Bjørn Petter Jelle, Andrew Hynd, Arild Gustavsen, Dariush Arasteh, Howdy Goudey, Robert Hart, *Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities*, in "Solar Energy Materials and Solar Cells", Volume 96, January 2012, pagg

Carl M. Lampert, *Chromogenic smart materials*, in "Materialstoday", Volume 7, Issue 3, Marzo 2004, pagg

Kunyapat Thummavichai, Yongde Xia, Yanqiu Zhu, *Recent progress in chromogenic research of tungsten oxides towards energy-related applications*, in "Progress in Materials Science", Vol 88, 2017, pagg 313-316

W. Feng, L. Zou, G. Gao, G. Wu, J. Shen, W. Li, *Solar energy materials & solar cells gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis*, in "Sol. Energy Mater. Sol. Cells", volume 144, 2016, pagg 316–323

Alessandro Cannavale, Michele Manca, Francesco Malara, Luisa De Marco, Roberto Cingolania, Giuseppe Gigli, *Highly efficient smart photovoltachromic devices with tailored electrolyte composition*, in "Energy and Environmental Science", Volume 4, Issue 7, Luglio 2011, pagg 2567-2574

M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino, *Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies*, in Building and Environment, vol. 42, 2007 pagg 2829–2834

Jan Wienold, Jens Christoffersen, *Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras*, in "Energy and Buildings", vol 38, 2006, pagg 744–745

### Capitolo 3

R. Sullivan, E.S. Lee, K. Papamichael, M. Rubin, S. Selkowitz, *Effect of switching control strategies on the energy performance of electrochromic windows*, in SPIE, vol 2255, 1994, pagg 443-455

J. Karlsson, B. Karlsson and A. Roos, *Control strategies and energy saving potentials for variable transmittance windows versus static windows*, consultato su <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.531.5524>

J. Karlsson, *Control system and energy saving potential for switchable windows*, Seventh International IBPSA Conference

F. Gugliermetti, F. Bisegna, *Visual and energy management of electrochromic windows in mediterranean climate*, in "Building and Environment", vol 38, 2003, pagg 479 – 492

E.S. Lee, A.Tavil, *Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs*, in "Building and Environment" 42, 2007, pagg 2439–2449

M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino, *Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies*, in "Building and Environment", vol 42, 2007, pagg 2829–2834

Ji-Hyun Kim, Young-Joon Park, Myoung-Souk Yeo, Kwang-Woo Kim, *An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer*, in "Building and Environment", vol 44, 2009, pagg 1517–1527

Andreas Jonsson, Arne Roos, *Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations*, in "Solar Energy", vol 84, 2010, pagg 1–9

D. B. Belzer, *An exploratory energy analysis of electrochromic windows in small and medium office buildings – simulated results using energyplus*, consultato su [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-19637.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19637.pdf)

E.S. Lee, E.S. Claybaugh, M. LaFrance, *End user impacts of automated electrochromic windows in a pilot retrofit application*, in Energy and Buildings, vol 47, 2012, pagg 267–284

Dan Jestico, *Performance assessment of SageGlass® electronically tintable glazings*, consultato su [https://www.sageglass.com/sites/default/files/etg\\_j\\_final.pdf](https://www.sageglass.com/sites/default/files/etg_j_final.pdf)

Paladino and Company, *Performance Assessment of SageGlass® Electrochromic Coatings and Control Scenarios*, consultato su [https://www.sageglass.com/sites/default/files/whitepaper\\_final.pdf](https://www.sageglass.com/sites/default/files/whitepaper_final.pdf)

Gyeong Yun, Kap Chun Yoon, Kang Soo Kim, *The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings*, in "Energy and Buildings", vol 84, 2014, Pages 70-85

R.C.G.M. Loonen, S. Singaravel, M. Troka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen, *Simulation-based support for product development of innovative building envelope components*, in "Automation in Construction", vol 45, 2014, pagg 86–95

Fabio Favoino, Francesco Fiorito, Alessandro Cannavale, Gianluca Ranzi, Mauro Overend, *Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates*, in "Applied Energy", vol 178, 2016, pagg 943–961

## SITOGRAFIA

Energy Information Administration, International Energy Outlook 2006, U.S. Department of Energy, Giugno 2006, consultato su <https://www.eia.gov/> [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf)

Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050, Residential energy consumption survey (RECS), consultato su [www.eia.gov/aeo](http://www.eia.gov/aeo)

<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>.

[http://www.nextville.it/Controllo\\_termico/1083/Chiusure\\_trasparenti](http://www.nextville.it/Controllo_termico/1083/Chiusure_trasparenti)

<http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/vetro-intelligente-e-ad-alte-prestazioni-efficienza-e-risparmio-energetico/>

H.Pfaender, Schott Guide to Glass, Springer, Netherlands, 1996, pp.51–83, consultato su [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0517-0\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0517-0_4).

G. Leftheriotis, P. Yianoulis, Comprehensive Renewable Energy, A. Sayigh (Ed.), Elsevier, Oxford, 2012, pp. 313–355, consultato su <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00310-3>

ChromoGenics, Smart Windows, retrieved 29 July 2010, [/www.chromogenics.com/smart\\_eng.htm](http://www.chromogenics.com/smart_eng.htm).

Predicting Thermal Comfort, Thermal Comfort, consultato su <http://ceae.colorado.edu/>

Useful Daylight Illuminance, Daylighting Pattern Guide, consultato su <https://patternguide.advancedbuildings.net/>