



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo

L. Giovannini, M. Baracani, F. Favoino, A. Capozzoli, V. Serra,
V. R. M. Lo Verso, A. Pellegrino



ANALISI DI COMPONENTI TRASPARENTI DINAMICI: PRESTAZIONE ENERGETICA, COMFORT E STRATEGIE DI CONTROLLO

Responsabile scientifico: V. Serra (Dipartimento Energia, Politecnico di Torino)

Gruppo di Lavoro:

M. Baracani, A. Capozzoli, F. Favoino, L. Giovannini, V.R.M. Lo Verso, A. Pellegrino
(Dipartimento Energia, Politecnico di Torino)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

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

Obiettivo: D. Gestione di edifici in contesto Smart District e scenari di Demand-Response

Responsabile del Progetto: ing. Giovanni Puglisi ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi.

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Valentina Serra

Indice

Sommario

Indice.....	3
Sommario.....	5
1 Introduzione.....	6
2 Stato dell'arte.....	7
2.1 Sistemi vetriati dinamici attivi	7
2.2 Controllo di sistemi vetriati dinamici attivi.....	9
3 Caratterizzazione sperimentale della performance di sistemi vetriati elettrocromici	11
3.1 Parametri prestazionali.....	13
3.1.1 Trasmissanza termica	13
3.1.2 Fattore solare equivalente.....	14
3.1.3 Trasmissione solare.....	16
3.1.4 Trasmissione luminosa.....	17
3.2 Validazione del modello numerico	19
4 Caratterizzazione numerica della performance di sistemi vetriati elettrocromici	19
4.1 Parametri prestazionali.....	20
4.1.1 Parametri prestazionali energetici.....	20
4.1.2 Parametri prestazionali di comfort visivo	20
4.2 Contesto climatico	21
4.3 Modello numerico.....	22
4.4 Caso studio.....	23
4.5 Strategie di controllo	25
4.6 Parametri di controllo.....	26
4.7 Risultati	27
4.7.1 Risultati simulazioni numeriche – Torino.....	27
4.7.2 Risultati simulazioni numeriche – Roma.....	35
4.7.3 Risultati simulazioni – Abu Dhabi.....	41
4.8 Discussione.....	46
5 Conclusioni.....	50
6 Riferimenti bibliografici.....	51
Appendice A – Analisi di letteratura delle strategie di controllo e schede di sintesi	53
Riferimenti bibliografici Appendice A	81
Curriculum scientifico del gruppo di lavoro.....	82

Sommario

L'attività di ricerca svolta per il progetto PAR 2017, durante il periodo 2017-2018, dal titolo "Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo" presso il Politecnico di Torino, ha avuto lo scopo di valutare l'influenza delle strategie di controllo di tecnologie trasparenti dinamiche attive (i.e. vetri elettrocromici) sulla prestazione energetica degli edifici e sul comfort termico e visivo, andando ad investigare anche le implicazioni in termini di flessibilità energetica e profilo di domanda dell'edificio rispetto alla rete elettrica nazionale. L'attività si è svolta in due fasi principali:

- a) Caratterizzazione sperimentale di un componente vetrato dinamico attivabile, nello specifico un vetro elettrocromico, integrato in una test cell esposta a condizioni climatiche reali e simulante un ambiente tipo per valutarne le prestazioni in condizioni reali di esercizio. Ciò ha permesso di: i) valutare i parametri prestazionali di riferimento (trasmittanza termica, coeff. di trasmissione solare totale, trasmissione solare e luminosa) nei diversi stati di colorazione; ii) quantificare l'influenza della variazione delle proprietà ottiche e termofisiche del componente vetrato sui carichi energetici dell'ambiente (long-wave, short-wave, diretti ed indiretti) e sulle conseguenti condizioni termoigrometriche e luminose interne; iii) la calibrazione di un modello numerico di simulazione che ha permesso una campagna parametrica di simulazioni numeriche
- b) Analisi numerica degli effetti di numerose strategie di controllo e sulle prestazioni energetiche e di comfort visivo nonché sui carichi di picco del sistema edificio – impianto. In particolare è stata valutata l'efficacia di diverse strategie di controllo di cui alcune documentate in letteratura, (Rule Based Control, RBC) nell'ottimizzare le condizioni di comfort visivo interno, fabbisogno energetico e carichi di picco.

I risultati generali dell'attività di ricerca del PAR 2017 sono di seguito sintetizzati.

Il vantaggio dell'integrazione di componenti dinamici vetrati di involucro controllati attivamente risiede nella capacità delle logiche di controllo individuare dinamicamente condizioni di trade-off relative a molteplici obiettivi prestazionali (i.e. riduzione dei fabbisogni energetici, miglioramento del comfort visivo interno e riduzione dei carichi di picco dell'impianto e conseguentemente della rete elettrica).

La variabilità di queste prestazioni ed il raggiungimento delle prestazioni attese sono strettamente legate alle strategie di controllo utilizzate. In altre parole la messa in campo di strategie di controllo non ottimizzate, potrebbe pregiudicare il raggiungimento delle prestazioni attese che potrebbero essere peggiori rispetto a quelle ottenibili con vetrate tradizionali, i.e. vetri camera con rivestimenti selettivi.

Per assicurare la corretta integrazione edilizia di tecnologie dinamiche trasparenti, risulta necessaria una corretta progettazione delle strategie di controllo.

Ciò deve essere perseguito attraverso: il corretto utilizzo e l'integrazione nel processo progettuale di strumenti di simulazione avanzata (come quelli sviluppati nell'ambito del PAR); la progettazione e l'utilizzo di modelli numerici affidabili ed efficaci (in termini di accuratezza, velocità di calcolo e costo di implementazione) che supportino il controllo in tempo reale di elementi trasparenti di involucro.

1 Introduzione

L'integrazione di tecnologie dinamiche trasparenti nell'involucro edilizio può influenzare largamente le prestazioni del sistema edificio – impianto sotto diversi punti di vista, tra cui la prestazione energetica, il comfort termico e visivo, la flessibilità energetica ed il profilo di domanda dell'edificio rispetto alla rete elettrica nazionale. Oltre alle proprietà fisiche (ottiche e termiche) delle tecnologie dinamiche trasparenti, uno dei fattori che influenza maggiormente le prestazioni degli edifici che integrano questi componenti risulta essere la strategia di controllo adoperata per questi componenti dinamici.

Il presente report documenta l'attività svolta per il progetto PAR 2017, durante il periodo 2017-2018, dal titolo "Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo". La presente attività, svolta presso il Politecnico di Torino, ha avuto lo scopo di valutare l'influenza delle strategie di controllo di tecnologie trasparenti dinamiche attive sulle prestazioni degli edifici. In particolare l'attività si è svolta in due fasi:

- a) *Caratterizzazione sperimentale di un componente vetrato dinamico attivabile*, nello specifico un vetro elettrocromico, *integrato in una test cell esposta a condizioni climatiche reali e simulante un ambiente tipo* al fine di per valutarne le prestazioni in condizioni reali di esercizio. Ciò ha permesso di: i) valutarne i parametri prestazionali di riferimento (trasmissione termica, coeff. di trasmissione solare totale, trasmissione solare e luminosa) nei diversi stati di colorazione; ii) quantificare l'influenza della variazione delle proprietà ottiche e termofisiche del componente vetrato sui carichi energetici dell'ambiente (long-wave, short-wave, diretti ed indiretti) e sulle conseguenti condizioni termoigrometriche e luminose interne; iii) calibrare un modello numerico che permetta un approfondimento sulle strategie di controllo

- b) *Modellazione numerica di strategie di controllo del componente*: analisi delle diverse logiche di controllo del componente dinamico attraverso modelli simulativi. In particolare è stato confrontato l'effetto delle diverse strategie di controllo documentate in letteratura (Rule Based Control, RBC) al fine di ottimizzare le condizioni di comfort interno e il fabbisogno energetico. Inoltre nell'ottica futura di ottimizzare ulteriormente i controlli per massimizzare determinate prestazioni, è stato possibile definire i requisiti per metodi di controllo più avanzati.

La prima parte della presente relazione, documenta lo stato dell'arte sulle:

- tecnologie di involucro dinamiche trasparenti (attive e passive);
- strategie di controllo per tecnologie dinamiche attive.

Nella seconda sezione viene presentata la caratterizzazione del componente dinamico trasparente attivo integrato in una test cell esposta a condizioni climatiche reali.

Nella terza parte viene analizzato l'effetto di strategie di controllo sulle prestazioni di un edificio attraverso simulazione numerica, in tre climi diversi, per mezzo del modello numerico calibrato su dati sperimentali.

Le strategie di controllo analizzate sono il risultato di una ricerca estensiva sulle strategie di controllo utilizzate per tecnologie trasparenti dinamiche di involucro e riassunta in forma di schede in appendice al presente documento.

2 Stato dell'arte

2.1 Sistemi vetrati dinamici attivi

I componenti vetrati dinamici sono generalmente caratterizzati da uno o più strati funzionali trasparenti di materiali diversi (inorganici e/o organici, inclusi materiali cromogenici) integrati tra due o più strati di vetro piano ed assemblati all'interno di vetri camera. Il principio alla base dei componenti trasparenti dinamici consiste nella possibilità di controllare la radiazione solare che attraversa il componente vetrato per mezzo della variazione delle proprietà ottiche del materiale cromogenico che si adotta.

I componenti vetrati dinamici si classificano in vetri dinamici passivi ed attivi. Nei vetri dinamici passivi la variazione delle proprietà ottiche (e di conseguenza della radiazione solare e luminosa entrante) avviene in funzione delle sollecitazioni che agiscono sul componente grazie ad un meccanismo cromogenico intrinseco al materiale. Nei vetri dinamici attivi, invece, la variazione delle proprietà ottiche è ottenuta per mezzo di segnale elettrico esterno (i.e. differenza di potenziale). A seconda del meccanismo fisico di variazione delle proprietà ottiche dello strato cromogenico, i vetri dinamici passivi possono ulteriormente classificarsi in: termocromici [1, 2], termotropici [3, 4] e fotocromici [5]. Nei primi due casi la variazione delle proprietà ottiche è attivata per mezzo di una variazione di temperatura (termocromici e termotropici) mentre nell'ultimo caso per effetto dell'assorbimento della radiazione solare. La capacità di controllo dei vetri dinamici passivi risulta pertanto limitata dal principio intrinseco al loro funzionamento, per cui la variazione delle proprietà ottiche è determinata passivamente dall'entità e dalla variazione delle sollecitazioni nel tempo. L'impatto della performance di vetri dinamici passivi è stata analizzata e documentato nei precedenti progetti PAR [6] e documentata nelle seguenti pubblicazioni [7, 8].

I vetri dinamici attivi invece si possono classificare in base al tipo di strato cromogenico utilizzato per modulare le proprietà ottiche. Questi si dividono in Elettrocromici (EC), Suspended Particle Devices (SPD) e Liquid Crystals (LC) [9].

I vetri EC si dividono in all-solid-state EC [1] e gasochromic EC [10]. Negli all-solid-state EC il passaggio di ioni tra un ossido di metallo (W, Mo, Ir, Ti, V, Ni o Nb) con proprietà cromogeniche ed uno strato sorgente di ioni, attraverso un elettrolita, viene attivato da una differenza di potenziale applicata su dei substrati di un conduttore metallico trasparente [2]. Il materiale cromogenico più reperibile ed utilizzato è l'ossido di tungsteno (WO_x) che ha un intrinseco colore azzurro / blu nello strato più scuro. La variazione della quantità di ioni nello strato cromogenico determina la variazione delle proprietà ottiche del vetro (Granqvist, 2007; Jelle, 2013), facendo variare in modo continuo la colorazione del vetro (in trasmissione) da uno stato trasparente / azzurro ($T_{vis} = 0.5 - 0.6$, g-value=0.4 - 0.5) ad uno blu ($T_{vis} = 0.05 - 0.01$, g-value=0.1 - 0.05). La velocità di colorazione varia in modo consistente a seconda della grandezza dello strato cromogenico e può variare dai 5 (vetri 500 x 500 mm) ai 20 minuti (1.3 x 1.8 m). I gasochromic EC invece adottano gli atomi di ossidi di metallo sopracitati in stato gassoso ed utilizzano molecole di idrogeno, invece di una differenza di potenziale, per attivare la reazione redox che rende disponibili gli ioni che "colorano" lo strato cromogenico. Un'evoluzione degli all-solid-state EC è rappresentata dai foto-elettro-cromici (PEC) che presentano uno strato trasparente fotovoltaico che rende disponibile direttamente la corrente elettrica all'elemento EC, in modo tale che la modulazione delle proprietà ottiche sia direttamente attivata dalla radiazione solare convertita dallo strato trasparente fotovoltaico. La separazione elettrica dello strato fotovoltaico da quello elettrocromico permette sia un controllo passivo che attivo [5].

La modulazione delle proprietà ottiche negli SPD ed LC è raggiunta attraverso l'allineamento di particelle sospese in una soluzione elettrolitica (SPD) o di cristalli liquidi (LC) attraverso un campo magnetico indotto da una corrente elettrica [11]. In assenza di questo campo magnetico le particelle sono ordinate in maniera casuale, diffrangendo la radiazione e conferendo al vetro una certa colorazione che varia a seconda di come sono state dopate le molecole di cristalli liquidi. Per questo motivo SPD e LC hanno bisogno di una corrente continua per mantenere lo stato trasparente. Per mantenere le proprietà speculari del vetro i cristalli liquidi possono essere inseriti in una matrice

polimerica in modo da avere un coefficiente di rifrazione omogeneo. Nonostante la velocità di colorazione (< 1 sec), l'uso di SPD e LC è limitato dalla relativamente alta trasparenza dello stato più scuro (T_{vis} 0.15-0.20, g-value 0.15-0.10), e sono per lo più utilizzati come elementi di separazione interna.

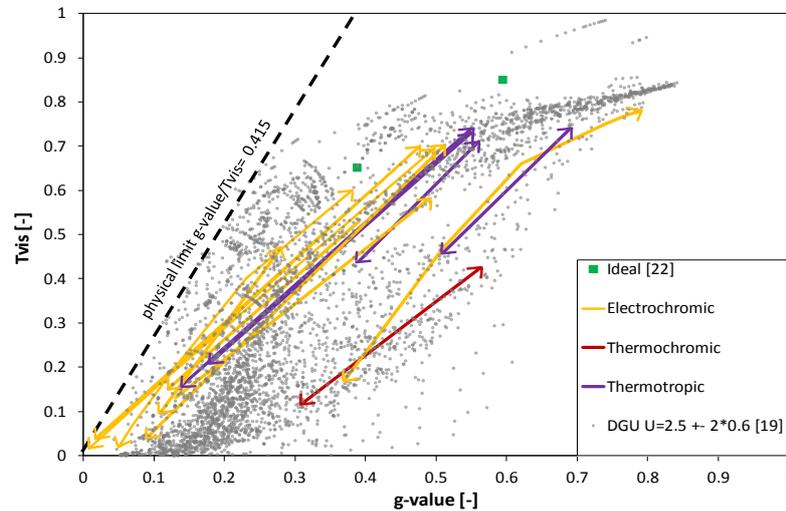


Figura 1. T_{vis} e g-value di vetri dinamici attivi e passivi (attualmente sul mercato) confrontato con diverse configurazioni di vetri camera tradizionali [12].

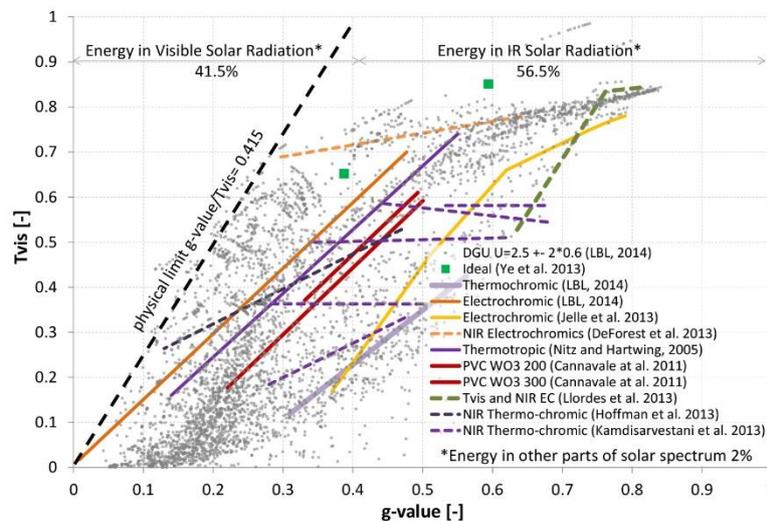


Figura 2. T_{vis} e g-value di vetri dinamici attivi e passivi attualmente sul mercato (linea continua) e innovativi (linea tratteggiata) confrontato con diverse configurazioni di vetri camera tradizionali [13].

Nelle figure 1 e 2 sono comparate la variazione delle proprietà termofisiche di vetri dinamici (attivi e passivi) presenti sul mercato (linee continue) ed in via di sviluppo (linee tratteggiate) con le proprietà termofisiche (T_{vis} e g-value) di diverse configurazioni di vetri camera tradizionali (DGU, Double Glazing Units, indicati in grigio nelle figure). Le proprietà delle DGU nelle figure sono ricavate dall'International Glazing Database (LBL, 2014) e ogni DGU è formata da due layer uguali di vetro di 10 mm ed un'intercapedine d'aria di 12 mm, dove il coating basso emissivo o selettivo si trova sempre sulla faccia esterna dell'intercapedine d'aria.

Attualmente i vetri elettrocromici all-solid-state presentano la più larga penetrazione nel mercato delle costruzioni tra tutte le tecnologie vetrate dinamiche esistenti, e sembrano essere la tecnologia più promettente in termini di miglioramento delle prestazioni degli edifici, dal punto di vista di riduzione del fabbisogno energetico, riduzione dei carichi elettrici di picco (per raffrescamento ed illuminazione), miglioramento del comfort interno (luminoso e termico). Ciò è dovuto principalmente alla maturità della tecnologia ed alla capacità di modulare le proprietà ottiche in un intervallo di variazione molto elevato, come si evince dalle figure 1 e 2, e per la versatilità del controllo attivo rispetto a tecnologie trasparenti dinamiche passive.

La ricerca attuale nel campo degli elettrocromici all-solid-state si sta concentrando sui seguenti aspetti [2]:

- Scalabilità: aumento delle dimensioni massime di produzione, *sputtering* e laminazione degli strati trasparenti e cromogenici funzionali;
- Velocità di switch: aumento della velocità di variazione della colorazione del vetro;
- Range di proprietà ottiche: aumento della trasparenza massima e diminuzione della trasparenza minima raggiungibile;
- Modulazione IR: sviluppo e integrazione di materiali elettrocromici che modulano solo la quantità di radiazione solare nel campo dell'Infra-Rosso;
- Colorazione: miglioramento della neutralità della colorazione del vetro (in trasmissione e riflessione);
- Flessibilità del substrato: possibilità di *sputtering* degli strati funzionali e cromogenici su substrato flessibile per integrazione in vetri curvi;
- Controllo: analisi e ottimizzazione delle strategie di controllo per la massimizzazione della prestazione energetica negli edifici.

L'integrazione di queste tecnologie vetrate dinamiche nell'involucro degli edifici contribuisce al miglioramento della loro prestazione energetica incidendo sulla riduzione del fabbisogno di energia primaria, sulla riduzione dei carichi termici di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione, e sulla riduzione del rischio di surriscaldamento estivo. Inoltre tale tecnologia contribuisce ad un miglioramento nell'utilizzo della luce naturale, ad una riduzione dei fenomeni di abbagliamento dovuti a radiazione solare diretta e contrasto eccessivo, ad un aumento dell'efficienza di strategie di gestione della domanda di energia, volte anche all'utilizzo di fonti di energia rinnovabili.

Il raggiungimento di uno o più degli obiettivi sopra elencati dipende non solo dalle caratteristiche dei sistemi vetrate dinamici, ma in larga parte dalle strategie di controllo adottate durante l'esercizio dell'edificio [9, 14]. Per questo motivo l'oggetto del PAR 2017 si è concentrato sulla quantificazione dell'influenza del controllo di vetri elettrocromici sulle prestazioni degli edifici.

2.2 Controllo di sistemi vetrate dinamici attivi

Durante la gestione del sistema edificio - impianto, i sistemi vetrate dinamici possono essere controllati per rispondere contemporaneamente a molteplici e talvolta contrastanti requisiti prestazionali, i.e. comfort termico e visivo, riduzione di carichi di riscaldamento e raffrescamento, riduzione del fabbisogno di energia primaria etc. Ad esempio, in climi temperati, il rischio di abbagliamento può essere in contrasto con lo sfruttamento di apporti solari gratuiti ai fini del riscaldamento e del comfort termico nei mesi invernali, e con l'utilizzo della luce naturale [15].

Per questo motivo la progettazione ed implementazione di strategie e sistemi di controllo per l'integrazione di vetri dinamici, rappresenta una importante opportunità da perseguire al fine di garantire una gestione efficiente dell'ambiente interno di un edificio [16]. Tuttavia, l'individuazione di strategie di controllo ottimizzate di componenti trasparenti dinamici è particolarmente difficoltosa sia per l'esistenza di requisiti contrastanti, sia per l'influenza reciproca tra i parametri di progettazione della tecnologia del componente e quelli dell'edificio, dei sistemi impiantistici che lo

servono, considerando la variabilità delle condizioni climatiche interne, la variazione dei requisiti di comfort e le preferenze degli occupanti [17].

La maggior parte delle strategie di controllo attualmente adottate (in studi di simulazione, analisi sperimentali e su edifici reali) sono basate su semplici regole "if-then" o sull'utilizzo di set-point singoli o multipli pre-stabiliti, relativi a misure puntuali di condizioni ambientali interne ed esterne [14]. I parametri più utilizzati per il controllo di vetri attivi trovati in letteratura dipendono da i seguenti fattori: a) geometria solare; b) illuminamento orizzontale esterno; c) illuminamento verticale sulla facciata; d) radiazione solare esterna verticale sulla facciata (con set-point molto differenti da 100 W/m^2 a 800 W/m^2 a seconda di orientamento e rapporto opaco-trasparente della facciata); e) illuminamento sul piano di lavoro; f) presenza di occupanti; g) differenza tra temperatura interna ed esterna; h) accensione dell'impianto di riscaldamento o riscaldamento; i) modalità stagionale dell'impianto. Un numero ristretto di casi ha adottato una combinazione delle regole di controllo sopra elencate, mentre solo alcuni studi hanno testato l'utilizzo di controllo PI e PID basati sull'illuminamento interno, o di un controllo adattativo fuzzy basato sulle preferenze degli occupanti e su un insieme di misure di illuminamento interno, radiazione solare verticale esterna sul vetro e temperatura interna [18].

L'appendice A riassume in 14 schede le strategie di controllo più significative utilizzate per vetri dinamici, provenienti da studi numerici, sperimentali e casi reali.

Inoltre tali strategie di controllo sono generalmente concepite per soddisfare un unico requisito di prestazione dell'edificio, i.e. solo fabbisogno energetico totale o solo aspetti di illuminamento naturale interno e/o abbagliamento. Solo pochi studi hanno analizzato in modo più completo l'influenza delle strategie di controllo di componenti trasparenti dinamici considerando nella formulazione della strategia di controllo sia il requisito di prestazione energetica che di comfort visivo e termico. Questi studi dimostrano come la variazione dei set-point del controllo di un vetro dinamico, può determinare una forte variazione del comfort interno e della prestazione energetica dell'edificio: variazione di circa il 25% del fabbisogno di riscaldamento, 40% per il raffrescamento, 20% per illuminazione artificiale invernale e fino al 65% per l'illuminazione artificiale estiva [19, 20]. Loonen et al. [21] hanno stimato un'influenza di parametri di controllo sulla variazione del fabbisogno di energia globale del 30%, ed una variazione del comfort luminoso e termico tra il 40 ed il 70%, rispettivamente.

La stima dell'influenza del controllo sulla prestazione dell'edificio può essere efficacemente analizzata per mezzo di modelli numerici e software di simulazione [14, 22]. Tuttavia, l'accuratezza del risultato dipende dalla capacità del modello di rappresentare il sistema fisico reale e dall'incertezza associata ai dati di input disponibili. Per questo motivo la simulazione numerica deve essere coadiuvata da attività sperimentali, al fine di costruire modelli robusti e calibrati e disporre di accurati dati di input per la modellazione e caratterizzazione di sistemi vetrati dinamici. Inoltre gli attuali software di simulazione dinamica dell'edificio presentano certe limitazioni per la valutazione globale delle prestazioni di edifici che integrano la tecnologia dei vetri dinamici [23]. Queste limitazioni sono relative alla difficoltà di operare simulazioni che contengono i) analisi di prestazione energetica e di comfort visivo allo stesso tempo, ii) modellazione di controlli avanzati, iii) ottimizzazione di strategie di controllo.

Per ovviare a queste limitazioni lo studio condotto ha previsto lo sviluppo di una strategia simulativa ad-hoc basata sull'implementazione e l'integrazione di più strumenti di simulazione esistenti, che sono stati validati rispetto a dati sperimentali.

3 Caratterizzazione sperimentale della performance di sistemi vetri elettrocromici

L'attività sperimentale condotta tramite una facility sperimentale del tipo outdoor test cell è stata concepita con un duplice obiettivo: da un lato per caratterizzare, in termini energetici e luminosi, componenti di facciata trasparenti dinamici in condizioni climatiche interne ed esterne reali; dall'altro per validare in condizioni tipo il modello numerico utilizzato per le simulazioni.

Il monitoraggio in continuo delle variabili di interesse, descritto in dettaglio nella sezione successiva, è stato effettuato per più giorni consecutivi rappresentativi delle condizioni climatiche esterne nelle stagioni invernale, estiva e autunnale, al fine di verificare la prestazione del componente in funzione della variazione e intensità delle forzanti interne ed esterne.

Il componente analizzato è un vetro elettrocromico all-solid-state, il cui strato cromogenico è costituito da ossido di tungsteno (WO_x). Questo componente può variare le sue proprietà ottiche in funzione di un segnale esterno in differenza di potenziale. Nel suo stato più trasparente la sua colorazione è pressoché neutra, mentre al diminuire della trasmissione nel visibile (e nel solare), assume una caratteristica colorazione blu di Prussia. Al fine di testare il componente oggetto di analisi nella sua configurazione tipo in ambito italiano, dati i requisiti limite imposti dall'attuale legislazione, la lastra elettrocromica è stata, per metà della sua lunghezza, assemblata in vetrocamera (come lastra più esterna) con una lastra di vetro chiaro con rivestimento basso-emissivo in faccia 3 e intercapedine riempita con gas argon 90/10.

La caratterizzazione in campo di questo componente è stata effettuata mediante l'utilizzo della facility sperimentale TWINS (Testing Window Innovative Systems, figura 3), un apparato sperimentale sito presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, costituito da due outdoor test cell.



Figura 3. Vista esterna (destra) ed interna (sinistra) della facility sperimentale TWINS con il setup utilizzato per questo studio.

La test cell utilizzata nel presente studio è costituita da una facciata completamente vetrata rivolta verso Sud, e dalle altre 5 superfici, disperdenti verso l'esterno, fortemente isolate dal punto di vista

termico. La cella è dotata di un impianto di climatizzazione a tutt'aria esterna che ha la funzione di mantenere la temperatura dell'aria interna ad un valore di set-point definito.

La facciata vetrata è stata inoltre tripartita al fine di montare componenti trasparenti diversi che si affacciano sullo stesso ambiente interno ed esterno, permettendo quindi un confronto comparato tra soluzioni tecnologiche diverse. In particolare il componente elettrocromico sopra descritto è stato montato nella zona centrale, nella parte inferiore è stato posizionato un vetro termocromico (i cui dati sperimentali e di confronto esulano da questa trattazione), mentre nella parte superiore un vetrocamera convenzionale. Tutte e tre le vetrate sono vetrocamere con bassoemissivo e argon 90/10 e con la stessa trasmittanza termica in condizioni di colorazione neutra (vetrate dinamiche non attive), pari a $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (da modello di calcolo).

La vetrata centrale è stata ulteriormente suddivisa in due porzioni, una con il vetro elettrocromico nella configurazione vetro semplice, l'altra assemblata come descritto.

Nel dettaglio, con relativa nomenclatura, le tre diverse tipologie di sistema vetrato analizzate sono:

- Vetrocamera chiaro+chiaro con argon 90/10, lastra esterna 6 mm, camera 15 mm, vetro interno con rivestimento basso-emissivo (low-e) in faccia 3. Denominazione utilizzata: DGU
- Vetrocamera elettrocromico, con argon 90/10, lastra esterna elettrocromica 9 mm, camera 15 mm, vetro interno con rivestimento basso-emissivo (low-e) in faccia 3. Denominazione utilizzata: ECD
- Vetro elettrocromico singolo, 9 mm. Denominazione utilizzata: ECS

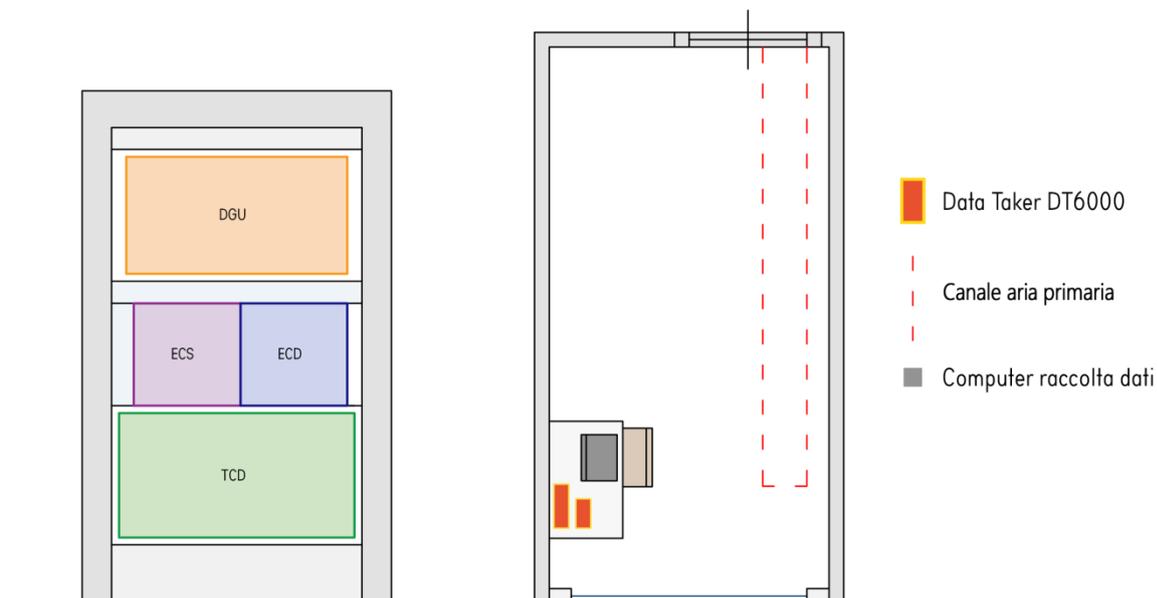


Figura 4. Rappresentazione schematica del setup sperimentale.

Al fine di caratterizzare la prestazione energetica dei componenti oggetto di test sono state misurate in continuo le seguenti grandezze:

- flussi termici trasmessi attraverso l'elemento di facciata (flussi termici superficiali), per mezzo di 4 termoflussimetri, (W/m^2), incertezza: $\pm 5\%$;
- radiazione solare trasmessa (flussi termici short-wave), per mezzo di 4 piranometri posizionati il più vicino possibile alla vetrata per ridurre l'errore nella misura, (W/m^2), incertezza: $\pm 3\%$;
- temperature superficiali delle lastre vetrate interne ed esterne, tramite 20 termocoppie tipo J, ($^{\circ}\text{C}$), incertezza: $\pm 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- temperature interne dell'ambiente, tramite 3 termocoppie tipo J, ($^{\circ}\text{C}$), incertezza: $\pm 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

- condizioni climatiche esterne: temperatura dell'aria esterna, tramite 1 termocoppia tipo J, (°C), Incertezza: $\pm 0,3$ °C; irradianza su piano verticale Sud, tramite 1 piranometro esterno, (W/m^2), incertezza: $\pm 3\%$;

Tutte le grandezze sono state rilevate con una frequenza di campionamento di 15', memorizzate sul sistema di acquisizione e periodicamente scaricate ed analizzate. In figura 5 è riportato lo schema dettagliato dei sensori, con indicazione della loro posizione.

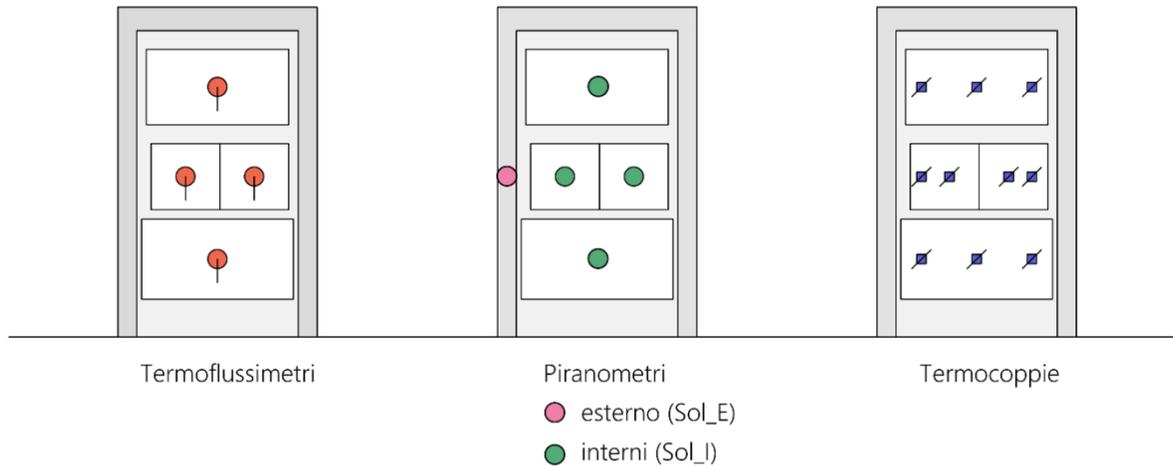


Figura 5. Schema dettagliato dei sensori utilizzati, con indicazione della loro posizione.

3.1 Parametri prestazionali

I parametri prestazionali di interesse ai fini della caratterizzazione sono: trasmittanza termica, fattore solare equivalente, trasmissione luminosa e solare. Nei paragrafi che seguono vengono illustrate le metodologie di elaborazione dei dati per i diversi aspetti trattati.

3.1.1 Trasmittanza termica

Per la valutazione della trasmittanza termica si è dapprima determinata la conduttanza interpolando il valore del flusso termico con la differenza di temperatura superficiale interna ed esterna, si sono quindi aggiunte al suo inverso le resistenze termiche liminari standard (R_{si} pari a $0,13$ m^2K/W e R_{se} pari a $0,04$ m^2K/W).

$$C = \left[\sum_i^n (\Delta T_{si} \cdot dq_i) \right] \cdot \left[\sum_i^n (\Delta T_{si}^2) \right]^{-1} \quad [W/m^2]$$

$$U = \frac{1}{R_{se} + \left(\frac{1}{C}\right) + R_{si}} \quad [W/m^2]$$

Si riportano in figura 6 i risultati ottenuti in condizioni notturne (assenza di radiazione solare) per il vetrocamera di riferimento DGU ($C=1,20$ W/m^2K , $U=1,00$ W/m^2K) e per l'elettrocromico assemblato in vetrocamera ECD ($C=1,31$ W/m^2K , $U=1,07$ W/m^2K)

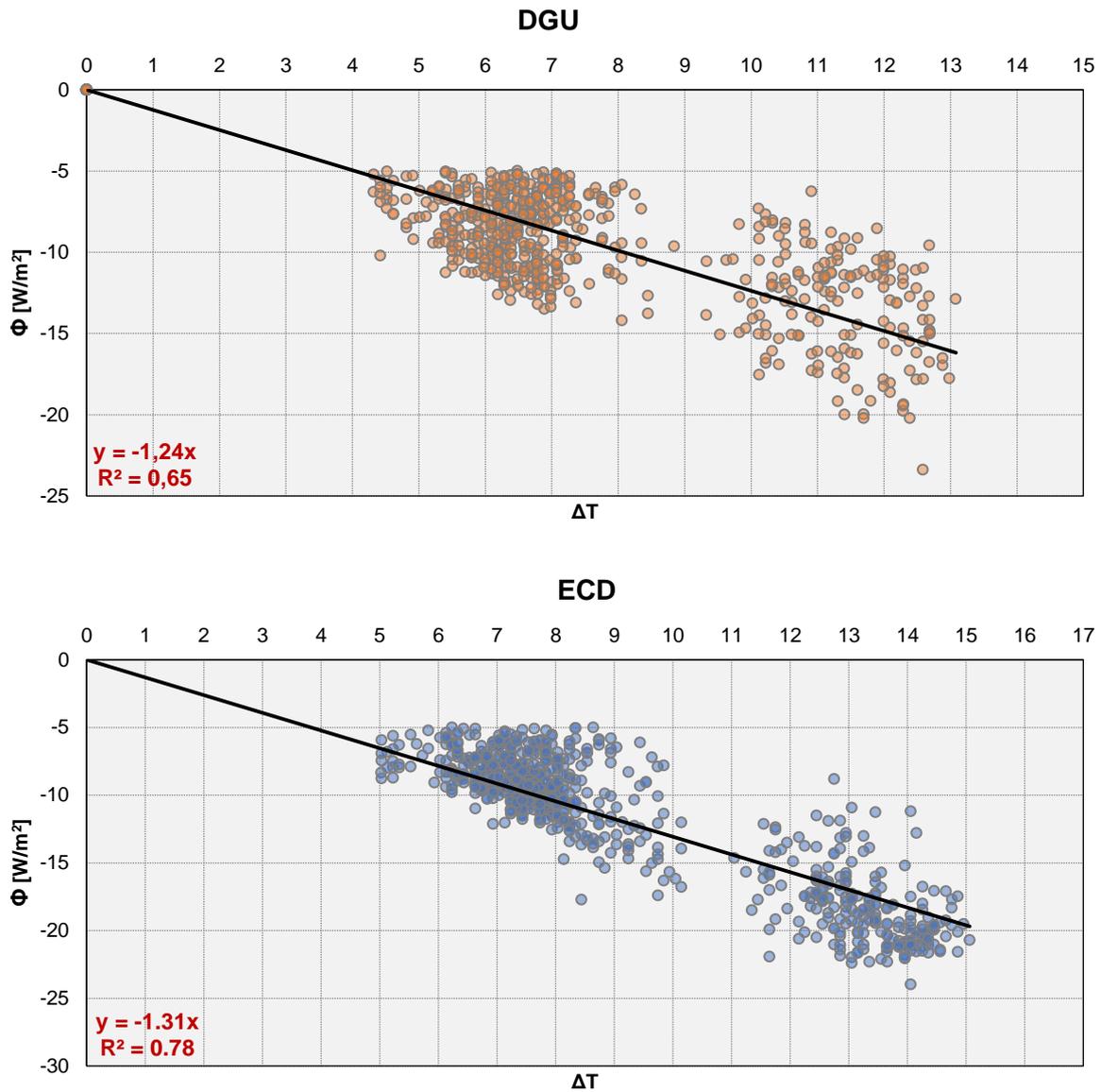


Figura 6. Interpolazione lineare per il calcolo della trasmittanza termica per vetrocamera convenzionale DGU (in alto) ed elettrocromico assemblato in vetrocamera ECD (in basso).

3.1.2 Fattore solare equivalente

Il fattore solare rappresenta la quota di radiazione solare, incidente sulla facciata, che viene trasmessa all'ambiente interno, sotto forma di radiazione a bassa lunghezza d'onda (radiazione solare trasmessa direttamente) e di radiazione ad elevata lunghezza d'onda. Quest'ultima è la quota di radiazione solare assorbita dalla facciata che viene riemessa nell'ambiente interno.

Il "fattore solare equivalente" prende in considerazione il flusso "totale" misurato. Tale flusso è la somma della radiazione solare direttamente trasmessa nell'ambiente interno (S_{INT}) e del flusso "superficiale" (F_{VI}) misurato all'interfaccia tra la vetrata e l'ambiente interno.

$$\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_{tot} = S_{INT} + F_{VI}$$

Il flusso “superficiale” include in sé il flusso dovuto alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed ambiente esterno e quella quota di radiazione solare che, assorbita dalla facciata, viene riemessa nell’ambiente interno. Nota la trasmittanza della facciata è possibile calcolare quale sarebbe il flusso trasmesso se, a parità di differenza di temperatura tra interno ed esterno, non fosse presente la radiazione solare. Tale flusso è pari a:

$$\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_{\Delta T} = U_{nott} \cdot \Delta T$$

Dove U_{nott} è la trasmittanza calcolata in condizioni notturne, e ΔT la differenza di temperatura tra ambiente esterno e ambiente interno.

Nel corso della giornata l’energia che attraverserebbe la facciata, se non fosse presente la radiazione solare, è:

$$E_{\Delta T} = \int_{8:00}^{20:00} \left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_{\Delta T} d\tau$$

L’energia totale che nel corso della giornata entra nell’ambiente interno attraverso la vetrata, è l’integrale del flusso “totale”:

$$E_{tot} = \int_{8:00}^{20:00} \left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_{tot} d\tau$$

Sottraendo all’energia totale l’energia legata alla sola differenza di temperatura, si ottiene l’energia entrante nell’ambiente interno legata alla presenza della radiazione solare.

L’energia solare che nel corso della giornata incide sulla facciata è:

$$E_{inc} = \int_{8:00}^{20:00} S_{OUT} d\tau$$

dove S_{OUT} è il flusso misurato dal piranometro esterno.

E così possibile definire il fattore solare “equivalente” di una singola giornata come:

$$TSET^* = \frac{E_{tot} - E_{\Delta T}}{E_{inc}}$$

Si riportano in figura 7 i fattori solari equivalenti dei tre sistemi vetrati (per l’elettrocromico è stato calcolato per lo stato intermedio 4), ottenuti dalle medie di dati relativi a tre condizioni climatiche diverse (cielo coperto, parzialmente coperto, sereno) in periodo invernale. Il vetrocamera convenzionale è caratterizzato da un fattore solare compreso tra 0,39 e 0,45, mentre l’elettrocromico in vetrocamera tra 0,19 e 0,22. I valori sono molto più bassi di quanto dichiarato nei cataloghi tecnici e atteso in base ai risultati ottenuti in termini di coefficiente di trasmissione solare diretto presso ENEA di Casaccia, a causa del posizionamento dei piranometri (quello esterno riceve più radiazione a causa dell’elevata albedo e quelli interni sono parzialmente ombreggiati dai telai). Dal punto di vista del confronto relativo tra soluzioni il dato è comunque consistente

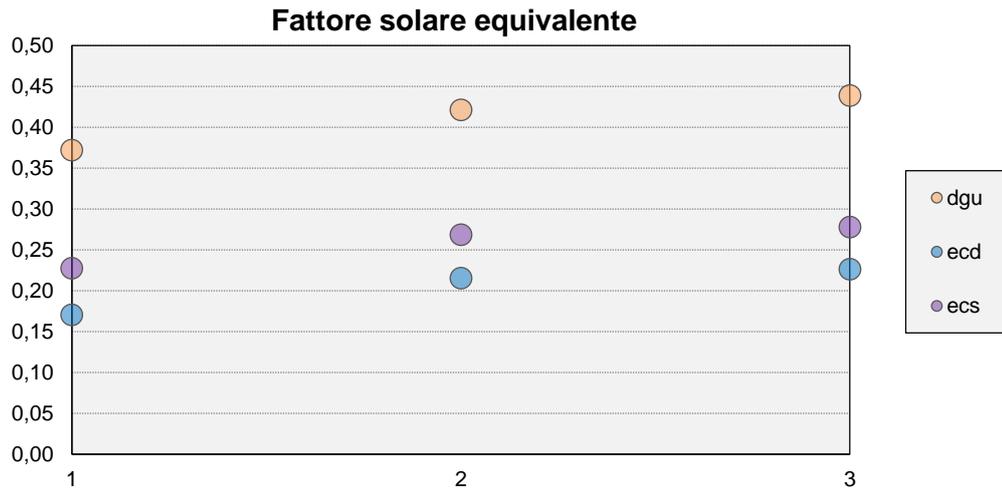


Figura 7. Fattore solare dei tre sistemi vetrati per tre condizioni climatiche diverse: 1) cielo coperto, 2) parzialmente coperto e 3) sereno. I dati relativi all'elettrocromico fanno riferimento allo stato intermedio 4.

Nel grafico in figura 8 si riportano i valori dei fattori solari per l'elettrocromico sia in vetrocamera sia in lastra singola, per tre diversi stati di colorazione. Si osserva che non è possibile indicare esattamente quale sia lo stato di colorazione (da 1 a 10) perché il vetro si è rivelato fortemente instabile nel mantenimento della condizione settata. Inoltre dopo un certo periodo di utilizzo non è più stato possibile raggiungere la condizione di neutralità iniziale per cui allo stato 10 non è più corrisposto un valore di trasmissione comparabile a quello di un vetro chiaro ma un valore decisamente più basso (riducendo quindi l'intervallo di variazione).

Dal punto di vista dell'analisi tuttavia i dati rilevati sono comunque significativi perché in grado di descrivere compiutamente il comportamento del vetro soprattutto se visti in integrazione con l'attività di caratterizzazione svolta presso l'ENEA di Casaccia.

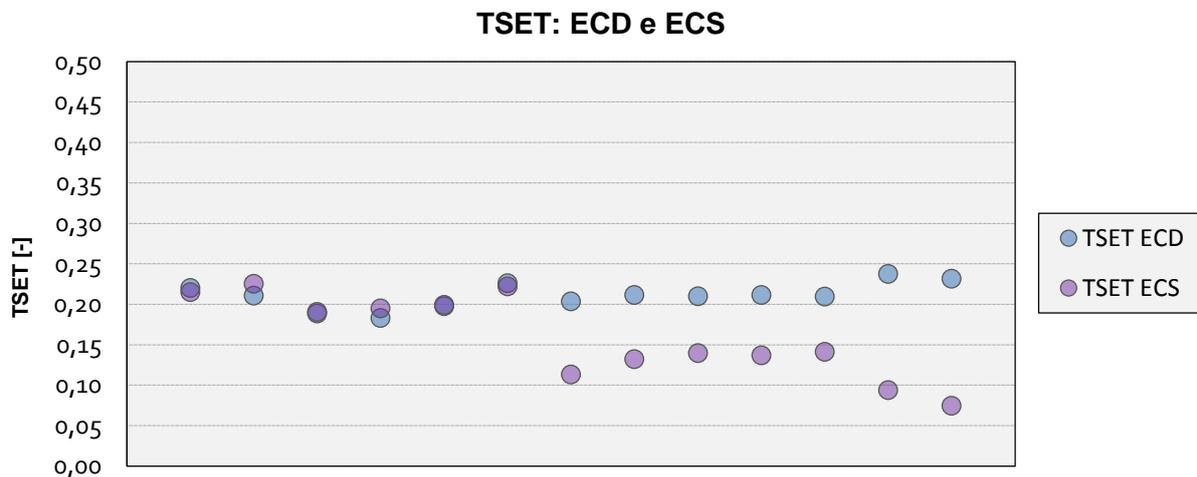


Figura 8. Fattore solare equivalente per tre diversi stati di colorazione.

3.1.3 Trasmissione solare

Il coefficiente di trasmissione solare delle facciate è stato calcolato attraverso i dati sperimentali come rapporto tra i valori di irradianza trasmessi (S_{INT}) e quelli incidenti sulla facciata (S_{OUT}), entrambi misurati sul piano verticale.

$$T_{sol} = \frac{S_{INT}}{S_{OUT}}$$

Il vetrocamera convenzionale presenta un valore compreso tra 0,39 e 0,46 (figura 9). Come già indicato in precedenza questo valore è inferiore al dato atteso a causa delle condizioni di rilievo dei piranometri. Trattandosi tuttavia di un confronto relativo tra sistemi questo non costituisce criticità.

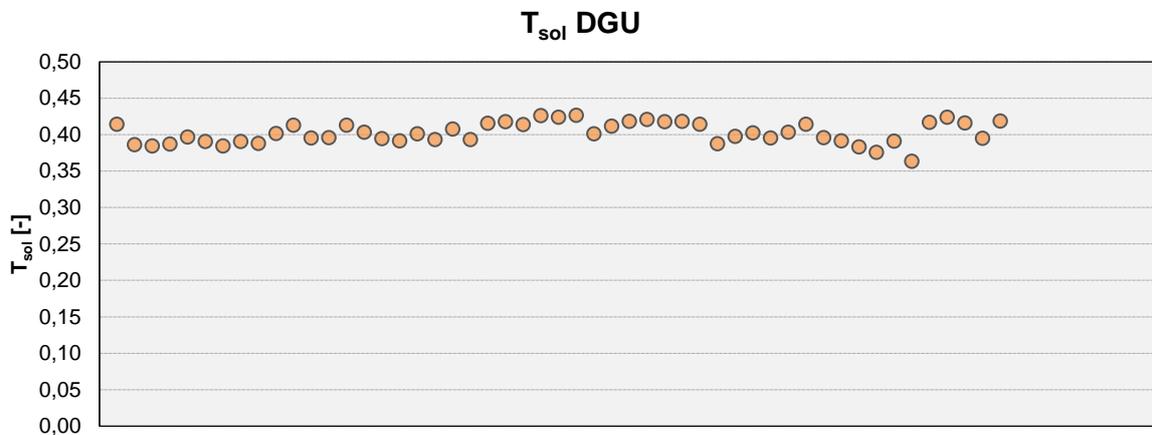


Figura 9. Trasmissione solare del vetrocamera di riferimento DGU.

Per il vetro elettrocromico è stata effettuata la determinazione del fattore di trasmissione solare imponendo diversi stati di colorazione in giornate con profili di radiazione solare confrontabili (figura 10). Si sottolinea quanto già detto in precedenza, cioè che il range di variazione nell'ultimo periodo di prove (con condizioni climatiche primaverili ed estive più stabili) è risultato notevolmente ridotto (da 0,29 a 0,07 per il vetro singolo e da 0,21 a 0,06 per la configurazione in vetrocamera), a causa del mantenimento di una colorazione azzurrognola anche allo stato 1.

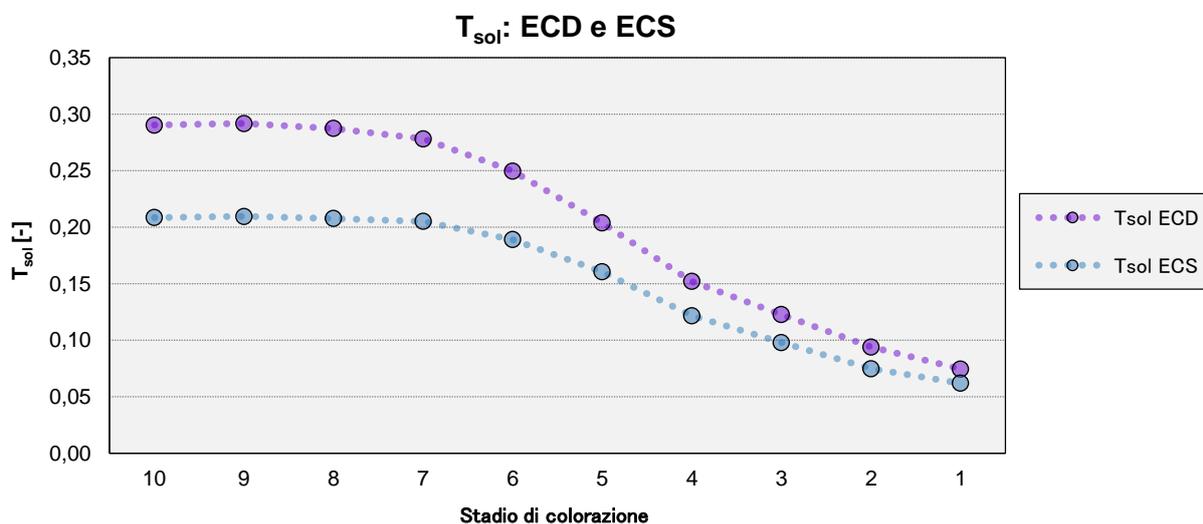


Figura 10. Trasmissione solare media del vetro elettrocromico per i 10 stadi di colorazione.

3.1.4 Trasmissione luminosa

Il coefficiente di trasmissione luminosa delle vetrate è stato calcolato attraverso il rapporto tra i valori di illuminamento trasmesso internamente (E_{INT}) e di illuminamento incidente all'esterno (E_{OUT}) entrambi misurati sul piano della vetrata. I valori sono stati misurati tramite misure spot in giornate caratterizzate da cielo sereno con spettrofotometri in grado di misurare la quota di

radiazione incidente tra 380 nm e 780 nm, con risoluzione di 1 nm. Oltre al dato integrato è stato possibile disporre quindi anche della distribuzione spettrale della radiazione visibile trasmessa.

$$T_{vis} = \frac{E_{INT}}{E_{OUT}}$$

Il grafico riportato in figura 11 presenta la trasmissione luminosa in funzione della lunghezza d'onda per il vetro elettrocromico nei diversi stati. Questa misura è stata condotta nella prima parte della sperimentazione, in cui il vetro elettrocromico era perfettamente funzionante e in grado di variare dallo stato 1 allo stato 10 in modo completo.

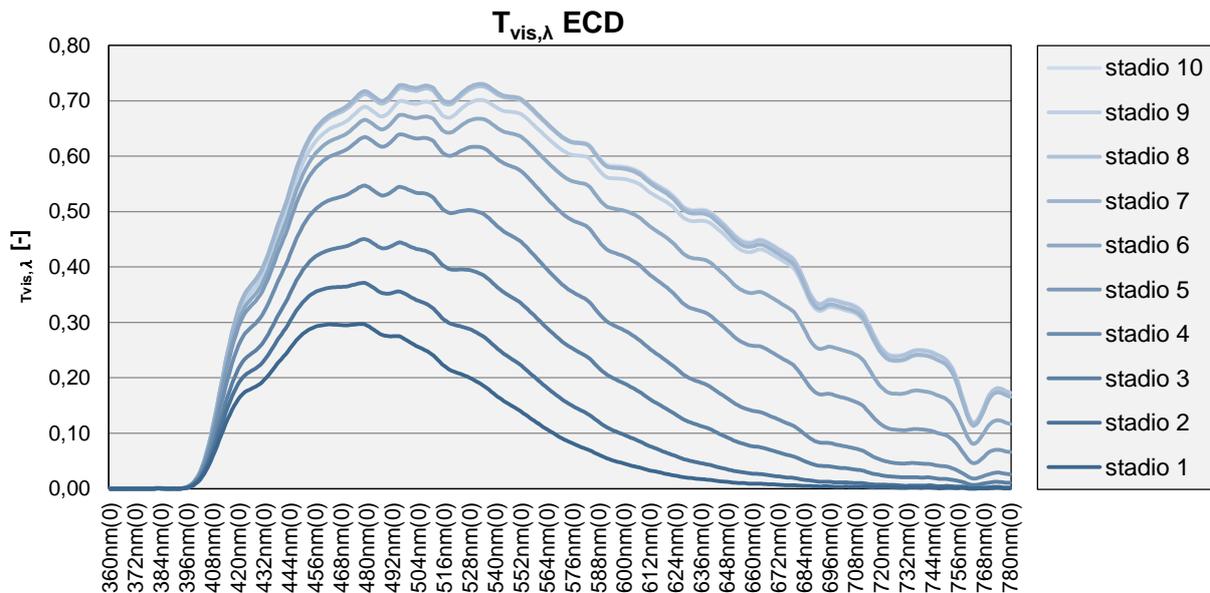


Figura 11. Trasmissione luminosa per lunghezza d'onda per vetro elettrocromico per i 10 stati di colorazione del vetro elettrocromico.

In figura 12 si riportano i valori di trasmissione luminosa T_{vis} per i tre vetri e per i diversi stati di colorazione.

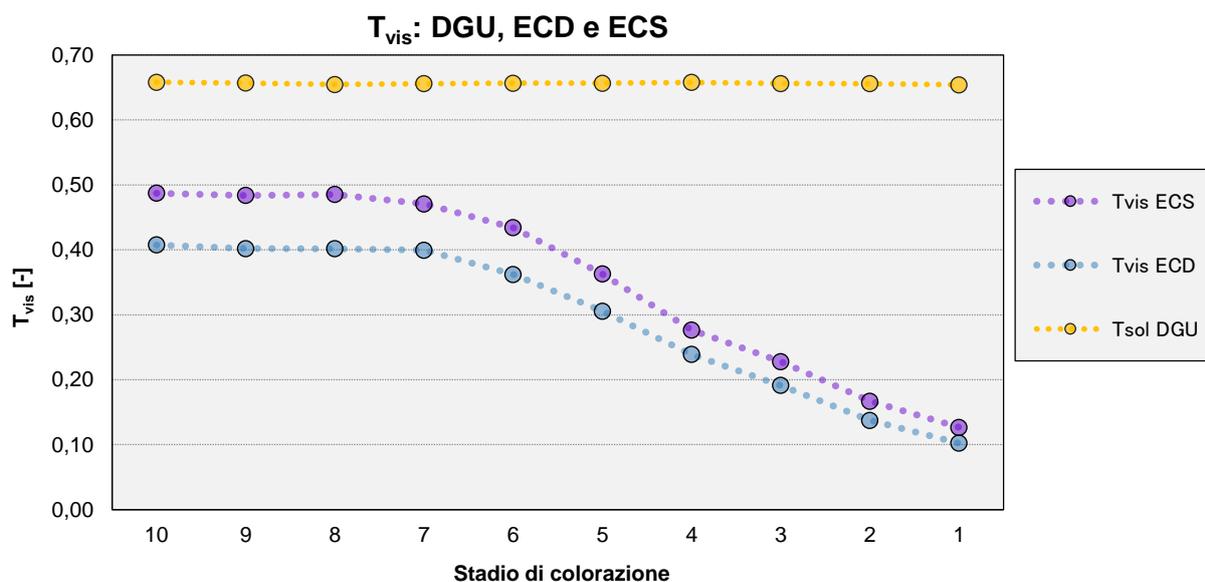


Figura 12. Trasmissione visibile del vetro chiaro e del vetro elettrocromico nei 10 stati di colorazione.

3.2 Validazione del modello numerico

I dati acquisiti nella fase di caratterizzazione sperimentale in campo sono stati utilizzati per validare modelli numerici sviluppati per i componenti trasparenti esaminati. Il processo di calibrazione ha consentito di ottenere un modello numerico validato attraverso il quale sono stati simulati numerosi scenari volti a valutare le potenzialità della tecnologia sulla prestazione energetica e il comfort interno.

Per la validazione del modello energetico si è proceduto confrontando i flussi termici misurati sperimentalmente con i flussi ottenuti dalle simulazioni in momenti rappresentativi dell'anno. Sono state quindi identificate delle giornate tipo con condizioni ambientali comparabili. La figura 13 mostra il confronto tra i valori di irradianza esterna calcolati e misurati nel periodo selezionato per la validazione.

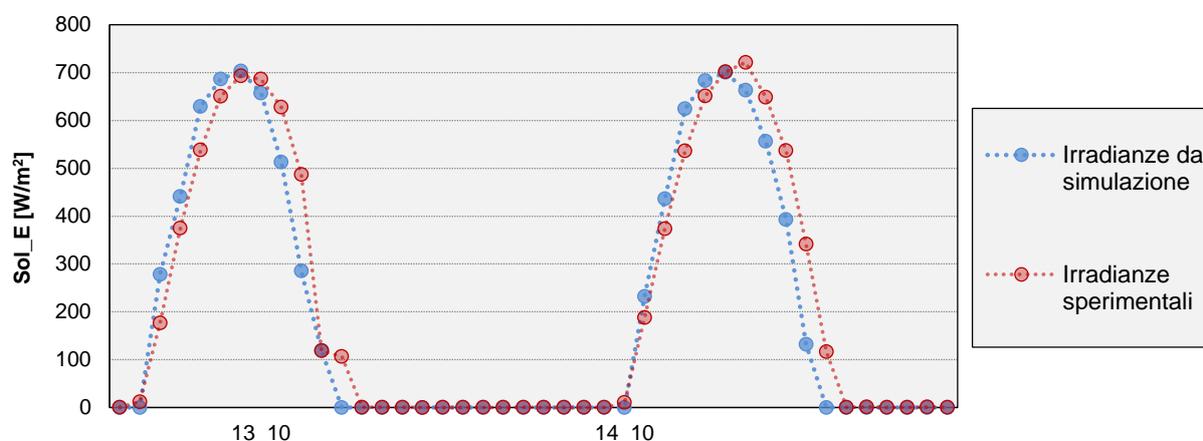


Figura 13. Confronto tra irradianze registrate sperimentalmente e immesse in simulazione per giornate comparabili.

La tabella 1 mostra il confronto, per ECD negli stadi 1 ($T_{sol}= 0.04$) e 4 ($T_{sol}= 0.11$), tra flussi termici sperimentali e simulativi per alcuni momenti significativi. Si osserva che i flussi registrati sperimentalmente sono assolutamente comparabili con quelli simulati.

Stato ECD	Ora	Sol_E _{simulato}	Sol_E _{misurato}	$\Psi_{simulato}$	$\Psi_{misurato}$
4	13:00	703	693.1	34.9	31.8
4	13:00	700	701.5	34.5	34.4
1	13:00	646.0	631.5	27.7	26.8

Tabella 1. Confronto tra irradianze registrate sperimentalmente e da simulazione e relativi flussi termici per giornate comparabili per ECD in diversi stati.

4 Caratterizzazione numerica della performance di sistemi vetriati elettrocromici

Nel seguente paragrafo è presentata un'estensiva analisi numerica, finalizzata alla valutazione annuale degli effetti di diverse strategie di controllo per il componente elettrocromico sulla prestazione energetica dell'ambiente e sul comfort visivo degli occupanti. Le strategie di controllo investigate sono state scelte, a partire dall'analisi di letteratura effettuata, in modo da confrontare tra loro le prestazioni relative a strategie di controllo mirate all'ottimizzazione di aspetti differenti:

prestazione energetica, comfort visivo oppure entrambi i precedenti aspetti. Le analisi sono state effettuate per tre climi molto diversi tra loro, al fine di mettere in luce vantaggi e svantaggi di ciascuna strategia di controllo anche in relazione alle diverse condizioni climatiche in cui il componente elettrocromico viene operato.

L'attività simulativa è stata svolta attraverso un metodo di simulazione innovativo, sviluppato presso il Politecnico di Torino, in grado di simulare contemporaneamente, e con un elevato grado di precisione, gli effetti della variazione delle proprietà termo-ottiche di un componente dinamico sulla prestazione energetica e sul comfort visivo dell'utente. I risultati relativi alle simulazioni numeriche sono caratterizzati da un alto grado di affidabilità, in quanto è stato possibile, attraverso i dati sperimentali provenienti dall'attività di caratterizzazione in campo del componente, effettuare una validazione *all'interfaccia* del modello numerico utilizzato per l'attività simulativa.

Segue una descrizione dettagliata della caratterizzazione numerica di sistemi vetri elettrocromici.

4.1 Parametri prestazionali

Sono stati valutati, attraverso il processo di simulazione numerica, diversi parametri prestazionali, relativi sia agli aspetti energetici che a quelli di comfort. Di seguito sono riportati i parametri prestazionali presi in considerazione all'interno del presente studio.

4.1.1 Parametri prestazionali energetici

Per quanto riguarda i parametri prestazionali energetici, questi ultimi sono stati selezionati e calcolati a partire dalla norma UNI TS 11300 [24]. Sono quindi stati selezionati i seguenti parametri:

Indice di prestazione energetica (EP_{GL}): l'indice di prestazione energetica, espresso in kWh/m²anno, esprime il consumo annuale di energia primaria riferito all'unità di superficie. L'indice di prestazione energetica globale è stato a sua volta scomposto rispetto ai servizi energetici principali, ovvero l'indice di prestazione energetica per il riscaldamento invernale (EP_H), l'indice di prestazione energetica per il raffrescamento estivo (EP_C) e l'indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale (EP_L).

Carico di picco sulla rete (Q): Il carico massimo richiesto, espresso in W/m², per ciascuno dei servizi energetici principali. È stato valutato il carico di picco registrato durante l'anno per il riscaldamento invernale (Q_H), il raffrescamento estivo (Q_C) e l'illuminazione artificiale (Q_L). Per quanto riguarda il riscaldamento invernale, ci si è riferiti all'energia primaria richiesta alla rete, mentre per raffrescamento ed illuminazione al vettore energia elettrica. Per questo motivo si è deciso di analizzare anche il carico di picco ottenuto considerando insieme tutti i servizi energetici forniti mediante energia elettrica, ovvero raffrescamento ed illuminazione artificiale (Q_{C+L}).

4.1.2 Parametri prestazionali di comfort visivo

Al contrario di quanto avviene per i parametri prestazionali energetici, i parametri prestazionali di comfort visivo indicati dalla normativa vigente risultano limitati, e perciò inadatti ad esprimere al meglio la prestazione visiva annuale di facciate dinamiche. L'unico parametro indicato da normativa [25] per la valutazione della disponibilità di luce naturale in ambiente è il Fattore medio di Luce Diurna (FLD_m), il quale però risulta del tutto inadeguato in presenza di componenti dinamici, in quanto il suo calcolo viene effettuato in maniera statica per un solo giorno dell'anno ed in presenza di cielo coperto. Risulta quindi chiaro che la dinamicità di componenti di facciata adattivi non è in alcun modo tenuta in considerazione. Per quanto riguarda la condizione di comfort in ambienti lavorativi [26], l'unico parametro relativo alla luce naturale riguarda l'illuminamento minimo da

mantenere sul piano di lavoro per lo svolgimento di un determinato compito visivo. Non sono invece contenute indicazioni per la valutazione del fenomeno di abbagliamento dovuto alla luce naturale. Sono quindi state selezionate due metriche, a partire da un'analisi di letteratura, per la valutazione dei due principali aspetti di comfort visivo, e cioè la disponibilità di luce naturale per lo svolgimento di un compito visivo e la condizione di abbagliamento dell'utente. In dettaglio, i seguenti indicatori sono stati utilizzati:

Daylight Autonomy (DA): la Daylight Autonomy [27] è definita come la percentuale di ore di occupazione dell'ambiente preso in esame per le quali la luce naturale da sola è sufficiente a raggiungere l'illuminamento minimo richiesto sul piano di lavoro. Rispetto al FLD_m , la Daylight Autonomy è in grado di considerare l'orientamento della facciata, il profilo di occupazione dell'utente e le possibili condizioni di cielo durante tutto l'anno. Questa metrica, oltre a valutare il comfort visivo dell'utente nello svolgimento di un compito visivo, assume anche un significato energetico, in quanto ogni qualvolta la sola luce naturale non è sufficiente a garantire l'illuminamento minimo richiesto sul piano di lavoro necessario allo svolgimento del compito visivo, diventa necessario l'utilizzo dell'illuminazione artificiale.

Daylight Glare Probability (DGP): La Daylight Glare Probability [28], ovvero la *Probabilità di abbagliamento dovuto alla luce naturale*, esprime la percentuale di persone insoddisfatte da un determinato ambiente visivo. Per questa metrica esistono quattro classi di comfort relative all'intensità dell'abbagliamento percepito [29], determinate a partire dal *Glare Rating Scale* [30]. I valori di soglia di ciascuna classe son stati determinati sperimentalmente. Le classi di comfort, con relativi valori limite di DGP, sono riportate nella tabella 2.

Classe di Comfort	Valori limite di DGP
Abbagliamento Impercettibile	$DGP < 35\%$
Abbagliamento Percepibile	$35\% \leq DGP < 40\%$
Abbagliamento Disturbante	$40\% \leq DGP < 45\%$
Abbagliamento Intollerabile	$DGP \geq 45\%$

Tabella 2. Classi di comfort, con relativi valori di soglia inferiore e superiore di DGP.

4.2 Contesto climatico

La prestazione di componenti di facciata trasparenti dinamici dipende strettamente dalle condizioni climatiche al contorno e, già a livello intuitivo, è possibile ipotizzare che il loro funzionamento sia tanto migliore quanto più le condizioni climatiche sono soggette a variazioni invernali ed estive. Maggiore è la necessità di adattarsi a una condizione temporanea e variabile nel tempo, maggiori sono le possibilità di miglioramento della prestazione dovute all'impiego di un sistema di facciata dinamico, rispetto all'utilizzo di un sistema tradizionale statico. Sono state quindi selezionate tre località geografiche, caratterizzate da climi molto diversi tra loro, al fine di valutare l'efficacia delle strategie di controllo analizzate al variare dei parametri ambientali esterni. Le tre località selezionate sono:

Torino (45.06°N 7.68°E): il clima per questa località è classificato come *sub-continentale* (2648 Gradi Giorno per riscaldamento, 84 Gradi Giorno per raffrescamento); il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale è predominante, benché nel periodo estivo si registrano temperature tali per cui il fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo non è trascurabile. Per il calcolo dell'indice di prestazione energetica per raffrescamento ed illuminazione è stato utilizzato un fattore di conversione da energia elettrica a primaria pari a 2.17. La sua posizione geografica fa inoltre sì che

in inverno il percorso solare risulti basso sull'orizzonte, intercettando il campo visivo degli utenti per gran parte della giornata e provocando quindi fenomeni di abbagliamento.

Roma (41.88°N 12.47°E): il clima per questa località è classificato come *mediterraneo* (1643 Gradi Giorno per riscaldamento, 183 Gradi Giorno per raffrescamento); il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale è ancora maggiore di quello per il raffrescamento estivo, il quale in ogni caso risulta significativo. Per il calcolo dell'indice di prestazione energetica per raffrescamento ed illuminazione è stato utilizzato un fattore di conversione da energia elettrica a primaria pari a 2.17.

Abu Dhabi (24.37°N 54.37°E): il clima per questa località è classificato come *arido sub-tropicale* (231 Gradi Giorno per riscaldamento, 1203 Gradi Giorno per raffrescamento); il fabbisogno energetico per il riscaldamento estivo è preponderante, ed il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale risulta del tutto trascurabile. Per il calcolo dell'indice di prestazione energetica per raffrescamento ed illuminazione è stato utilizzato un fattore di conversione da energia elettrica a primaria pari a 3.26, stimato a partire da [31]. Per questa latitudine il percorso solare risulta alto nel cielo per tutto l'anno, intercettando il campo visivo dell'utente solamente in un piccolo periodo durante l'anno, circoscritto attorno al solstizio invernale.

4.3 Modello numerico

La prestazione di componenti di facciata trasparenti dinamici è correntemente molto difficile da valutare a livello simulativo, in quanto i modelli numerici disponibili non sono in grado di valutare simultaneamente gli effetti del comportamento di questi componenti sui diversi domini fisici che essi influenzano, se non al prezzo di introdurre grandi semplificazioni, le quali portano necessariamente ad un basso livello di accuratezza nei risultati. Tramite un'estensiva analisi di letteratura sono state riscontrate due limitazioni principali nella valutazione della prestazione di componenti dinamici trasparenti e dei loro effetti sul comfort visivo e sulla prestazione energetica. Il primo problema è relativo all'impossibilità degli strumenti simulativi attualmente disponibili di far variare le proprietà termo-ottiche dei componenti analizzati durante il processo simulativo. Per i componenti trasparenti dinamici più diffusi sono disponibili modelli numerici che ne consentono la simulazione, ma per la maggior parte di questi una valutazione accurata delle prestazioni risulta molto complicata. La pratica corrente è quindi quella di simulare separatamente la prestazione relativa ad ogni stato termo-ottico che il componente può assumere, unendo poi a posteriori i risultati attraverso un'analisi delle forzanti esterne che governano la variazione di stato. Il risultato di questo processo è però altamente impreciso, in quanto non è in grado di tenere in considerazione l'inerzia termica del sistema, sottostimando o sovrastimando quindi i consumi energetici reali. La seconda limitazione riscontrata riguarda l'incapacità degli strumenti simulativi correntemente più utilizzati di valutare simultaneamente gli effetti del componente dinamico sui diversi domini fisici che esso influenza (comfort visivo, comfort termico, prestazione energetica). Ciò implica che queste valutazioni devono essere effettuate mediante modelli numerici diversi, non in grado di interfacciarsi tra loro. Il risultato è che quindi spesso il comportamento del componente adattivo valutato mediante i diversi modelli utilizzati non sia del tutto uguale, senza contare che fenomeni complessi afferenti a più domini fisici contemporaneamente, come l'isteresi dei componenti termocromici, non possono in nessun modo essere valutati.

L'adozione di tecnologie di facciata trasparenti dinamiche deve necessariamente comportare un risparmio energetico collegato ad un alto livello di comfort fornito all'occupante. In questo contesto una valutazione accurata della prestazione globale, relativa cioè a tutti i domini fisici che essi influenzano, risulta di primaria importanza. Per questo motivo al Politecnico di Torino è stato sviluppato uno strumento simulativo avanzato in grado di superare le limitazioni descritte in precedenza e consentire quindi un alto livello di accuratezza nella valutazione degli effetti di componenti trasparenti dinamici su aspetti energetici e di comfort visivo.

Il modello numerico ideato utilizza un software di simulazione illuminotecnica, DAYSIM [32], ed un software di simulazione energetica, EnergyPlus [33], e li interfaccia mediante un codice parametrico

appositamente sviluppato in Grasshopper [34], un plugin del Software CAD Rhinoceros [35]. Nello specifico, per la realizzazione del modello sono stati utilizzati due add-on di Grasshopper, LadyBug e HoneyBee [36], i quali consentono l'utilizzo parametrico di DAYSIM e EnergyPlus. Grazie all'utilizzo del modulo *Energy Management System (EMS)* di EnergyPlus è possibile far variare lo stato termo-ottico del vetro direttamente all'interno del processo simulativo.

L'innovazione principale di questo metodo risiede nel flusso di lavoro utilizzato, il quale è parametrico e completamente automatizzato. Le varie fasi del flusso di lavoro ideato sono di seguito illustrate nel dettaglio:

Fase 1: il comportamento dinamico del componente viene discretizzato in una serie di stati termo-ottici, per ognuno dei quali viene effettuata una simulazione annuale illuminotecnica. In questa fase sono calcolati per un intero anno i valori di DA e DGP per ogni stato termo-ottico definito.

Fase 2: i risultati illuminotecnici della fase 1 sono importati in EnergyPlus. All'interno dell'EMS viene descritto il comportamento dinamico del componente, associandolo alle forzanti che ne determinano il cambiamento delle proprietà termo-ottiche. Nel caso di componenti trasparenti passivi viene descritto il loro comportamento in base alla variazione delle forzanti esterne, mentre in caso di componenti attivi viene descritta la strategia di controllo che ne regola il funzionamento, associando alla variazione delle grandezze ambientali una o più azioni del componente in esame. È importante sottolineare che, contrariamente a quanto avviene nei processi simulativi attualmente disponibili, è qui possibile utilizzare contemporaneamente forzanti termiche, energetiche ed illuminotecniche.

Fase 3: una simulazione annuale è effettuata in EnergyPlus tramite l'EMS. In questa fase, ad ogni istante dell'anno viene effettuato un bilancio, al termine del quale le forzanti sopra descritte sono valutate e le proprietà termo-ottiche del componente sono cambiate di conseguenza prima di effettuare le stesse operazioni per l'istante immediatamente successivo. Al termine di questa operazione i parametri prestazionali energetici sono quindi calcolati, insieme ad un profilo di funzionamento annuale del componente in esame.

Fase 4: attraverso il profilo di funzionamento creato nella fase precedente vengono post-processati ed infine uniti i risultati illuminotecnici calcolati nella fase 1, ottenendo quindi dei parametri prestazionali annuali anche per il comfort visivo. È importante sottolineare che unire a posteriori risultati illuminotecnici non porta in alcun modo ad una incertezza più elevata nei risultati, in quanto, a differenza dei risultati energetici, quelli illuminotecnici non sono soggetti a nessun fenomeno di inerzia.

Come si può vedere, nel metodo simulativo proposto le proprietà termo-ottiche del vetro vengono cambiate direttamente nel processo simulativo, superando di fatto la limitazione relativa al non poter tenere in considerazione l'inerzia termica nella simulazione. Inoltre è possibile notare che il processo simulativo proposto valuta, simultaneamente e con un alto grado di accuratezza, gli effetti del comportamento del componente trasparente dinamico sulla prestazione energetica e sul comfort visivo.

Il metodo di simulazione appena descritto è stato utilizzato in questo studio per valutare l'efficacia di diverse strategie di controllo per il componente elettrocromico in esame in termini di prestazione energetica e di comfort visivo.

4.4 Caso studio

Il caso studio su cui sono state effettuate le valutazioni energetiche e di comfort visivo esemplifica l'ufficio cellulare tipo in edifici per uffici. Esso ha una profondità di 4.5 m, una larghezza di 3.6 m ed un'altezza dal pavimento al soffitto di 2.7 m. Una delle due pareti da 3.6 m x 2.7 m, orientata verso Sud, è interamente vetrata (Window-to-Wall Ratio = 1). La finestra è stata suddivisa, attraverso un sistema di montanti verticali ed orizzontamenti, in nove moduli. I tre moduli nella fascia superiore ed i tre nella fascia inferiore hanno un'altezza di 82.5 cm, mentre i tre moduli nella fascia centrale

hanno un'altezza di 85 cm. Questa configurazione della finestra è stata scelta in quanto molto

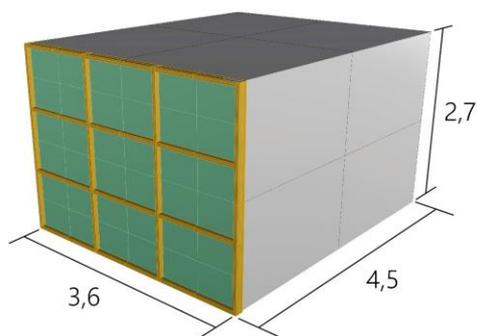


Figura 14. Vista del modello di ufficio utilizzato con riportate le dimensioni.

diffusa nelle facciate di edifici per uffici. Alla finestra sono stati applicati, oltre che il componente elettrocromico, anche due vetri selettivi tradizionali, utilizzati come riferimento rispetto al quale valutare la prestazione del componente in esame. Entrambi sono stati accoppiati in vetrocamera (camera da 16 mm riempita con argon al 90%) ad un vetro chiaro basso-emissivo, per un valore di trasmittanza termica (U) pari ad $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le proprietà dei due vetrocamera sono le seguenti: $T_{\text{vis}} = 0.62$ e $g = 0.3$ per un vetro selettivo ad alte prestazioni e $T_{\text{vis}} = 0.72$ e $g = 0.38$ per un vetro selettivo dalle prestazioni standard.

Per quanto riguarda il componente elettrocromico, si è scelto di utilizzare per la sua modellazione dati provenienti da misure di laboratorio. Questo perché la caratterizzazione in campo effettuata mediante l'apparato sperimentale TWINS è, per la natura stessa di questa operazione di monitoraggio a lungo termine, soggetta a fenomeni poco controllabili che possono anche condizionare i risultati finali dell'esperimento. Il modello numerico descritto in precedenza ed utilizzato per questo studio necessita invece di dati di input quanto più precisi possibile, essendo il flusso di lavoro dispendioso in termini costo e tempi computazionali. Una volta effettuata, tramite i dati ottenuti dalla caratterizzazione in campo, la validazione del modello numerico a livello di *interfaccia*, si è quindi preferito utilizzare per la modellazione del vetro elettrocromico dati provenienti da misure effettuate in un ambiente con condizioni al contorno controllate. I dati relativi alla trasmissione nello spettro visibile e solare utilizzati per modellare ognuno dei dieci stati del componente elettrocromico provengono da una caratterizzazione effettuata, mediante sfera integrante, nel centro ricerche ENEA-Casaccia. Tali dati sperimentali sono relativi al solo vetro elettrocromico, ma, al fine di migliorare l'efficienza energetica dello spazio in esame, il vetro elettrocromico è stato integrato in vetrocamera. Quest'ultimo ha caratteristiche del tutto simili a quelle descritte nel caso dei vetri tradizionali citati in precedenza, per un'analogia trasmittanza termica di $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tramite il programma WINDOW [37], sviluppato dal Lawrence Berkeley National Laboratory, sono stati ricavati i valori di trasmissione visibile, trasmissione solare e fattore solare del vetrocamera per ognuno dei dieci stati che il componente elettrocromico può assumere (tabella 3)

Stato	T_{vis}	T_{sol}	g
EC10	0.55	0.39	0.37
EC9	0.48	0.30	0.32
EC8	0.42	0.23	0.28
EC7	0.35	0.19	0.23
EC6	0.28	0.15	0.19
EC5	0.24	0.14	0.17
EC4	0.22	0.13	0.15
EC3	0.17	0.11	0.11
EC2	0.13	0.10	0.06
EC1	0.11	0.09	0.04

Tabella 3. Trasmissione visibile e solare e fattore solare del vetrocamera con integrato il componente elettrocromico per ognuno degli stato che esso può assumere.

Per alcune strategie di controllo analizzate sono state inoltre considerate delle veneziane interne o esterne. Entrambe sono state considerate con i seguenti angoli di rotazione delle lamelle: 0° (orizzontali), 15° e 30°. Le lamelle delle veneziane esterne sono state modellate con una larghezza di 5 cm, mentre le veneziane interne sono state considerate con una larghezza delle lamelle di 2.5 cm. La Daylight Autonomy è stata valutata per una griglia di punti posizionata ad un'altezza dal pavimento di 0.75 m. La griglia è stata applicata a tutto lo spazio preso in esame, non considerando una fascia perimetrale adiacente ai muri ed alla finestra dello spessore di 0.5m, in quanto tale area è tipicamente destinata al mobilio. I punti della griglia sono distanziati tra loro di 0.25 cm, per un totale di 130 punti di calcolo. Il valore di illuminamento minimo sul piano di lavoro è stato assunto pari a 500 lx, secondo quanto prescritto da [26]. La Daylight Glare Probability è stata valutata per una persona seduta (altezza dell'occhio dal pavimento di 1.2 m) posta nella linea di mezzera della stanza ad una distanza di 3 m dalla finestra, il cui sguardo è rivolto perpendicolarmente a quest'ultima, in modo da valutare la condizione di abbagliamento peggiore possibile. La tabella 4 contiene i fattori di riflessione attribuiti alle superfici del caso studio.

Superficie	Fattore di riflessione
Soffitto	70%
Muri	50%
Pavimento	30%
Terreno esterno (albedo)	10%
Serramento	90%
Veneziane	50%

Tabella 4. Superfici del caso studio con relativo fattore di riflessione utilizzato.

L'ufficio cellulare in esame è considerato come inserito all'interno di un edificio per uffici, e dunque in contatto con altre zone dalle stesse caratteristiche termiche. Per tale ragione tutte le partizioni verticali e orizzontali sono state considerate come adiabatiche, fatta eccezione per la finestra, la quale invece è considerata come rivolta verso l'esterno.

Gli impianti di riscaldamento e raffrescamento sono stati considerati come *impianti a capacità infinita*, in grado cioè di garantire, in qualsiasi condizione, le temperature di set-point invernale di 20°C ed estivo di 26°C. Il rendimento globale dell'impianto di riscaldamento è stata assunto pari a 0.85, mentre quella per l'impianto di raffrescamento è stato considerato un COP pari a 3.00. L'impianto di illuminazione è stato considerato come dimmerabile tramite fotosensore. Mediante il fotosensore viene valutato l'illuminamento sul piano di lavoro e, qualora questo sia inferiore al valore di soglia di 500 lx, l'impianto viene attivato per fornire solamente la quota di energia luminosa necessaria al raggiungimento del requisito minimo. Tale tipo di impianto consente di limitare il consumo energetico in quanto la sua potenza può essere modulata in condizioni di illuminazione naturale scarsa, ma non del tutto assente. Per l'impianto di illuminazione è stata considerata una densità di potenza di 7.00 W/m². Il fattore di assorbimento del ballast è stato considerato pari al 10%, mentre è stato assunto un valore di potenza parassita del fotosensore pari a 1 W. L'ufficio cellulare è considerato come occupato dalle 8 alle 17.

Relativamente alla simulazione illuminotecnica tramite DAYSIM, i seguenti parametri sono stati adottati: *ambient bounces (-ab)*=5, *ambient divisions (-ad)*=2048, *ambient resolution (-ar)* = 1024, *ambient super-samples (-as)* = 512, *ambient accuracy (-aa)* = 0.1.

4.5 Strategie di controllo

A partire dall'analisi di letteratura effettuata sono state selezionate diverse di strategie di controllo per il componente elettrocromico in esame. Come visto quest'ultimo influenza contemporaneamente sia l'aspetto energetico che quello di comfort visivo. Per questa ragione sono

state scelte sia strategie di controllo mirate all'ottimizzazione della prestazione energetica sia strategie concepite con l'obiettivo di massimizzare il comfort visivo per l'occupante. Le prime hanno come obiettivo la minimizzazione dei carichi termici per riscaldamento invernale e raffrescamento estivo, mentre le seconde mirano a minimizzare il fenomeno di abbagliamento. Per ciascun clima, a seconda dei risultati ottenuti per le strategie di base, si è provveduto a modificare queste ultime, in base anche alle caratteristiche del singolo clima, in modo da cercare di migliorare ulteriormente la prestazione del componente. È possibile affermare che la totalità delle strategie di controllo selezionate dalla letteratura sono *mono-obiettivo*, esse tentano cioè di ottimizzare le prestazioni del componente elettrocromico in un solo dominio fisico (energia o comfort visivo). Queste ultime sono quindi state modificate, tenendo conto della peculiarità di ciascun clima, al fine di tentare di migliorare le prestazioni del componente anche negli aspetti non oggetto di ottimizzazione.

In particolare, per quanto riguarda le strategie che hanno come obiettivo l'ottimizzazione della prestazione energetica, si è valutata l'incidenza della colorazione del vetro (e quindi della sua trasmissione visibile e solare) sul fabbisogno energetico globale. Si è quindi provveduto a modificare lo stato di colorazione massima del vetro, laddove ciò presentasse dei benefici, al fine di aumentare la disponibilità di luce naturale e migliorare il comfort visivo per l'occupante.

Nel caso invece delle strategie di controllo mirate a massimizzare il comfort visivo dell'occupante, si è nuovamente valutata l'incidenza della colorazione del vetro sul fabbisogno energetico globale, ma si è provveduto a modificare lo stato di colorazione massima del vetro, al fine di migliorare la prestazione energetica, solamente laddove tale operazione non presentasse svantaggi dal punto di vista del comfort visivo percepito dall'occupante. Nei casi estremi in cui nemmeno lo stato del componente elettrocromico con trasmissione visibile più bassa fosse in grado di prevenire l'abbagliamento, riducendolo ad un livello accettabile, si è provveduto a portare il componente nello stato che ne ottimizza la prestazione energetica. In taluni casi si è provveduto ad introdurre nel periodo estivo una soglia massima di trasparenza, inferiore alla trasparenza massima del componente, al fine di contenere gli apporti solari limitando gli effetti negativi sulla disponibilità di luce naturale.

Inoltre, per moderare nella stagione estiva l'effetto negativo di disponibilità di luce naturale in ambiente e il conseguente aumento del fabbisogno energetico per illuminazione, si è provveduto ad utilizzare non più lo stato più scuro del componente, ma quello che minimizza la somma del fabbisogno energetico per raffrescamento e per illuminazione. Di norma quest'ultimo non corrisponde allo stadio di massima colorazione del vetro elettrocromico.

Infine, per alcuni climi è stata valutata l'aggiunta di un sistema di ombreggiamento mobile, e cioè veneziane con lamelle orientabili, al fine di ottimizzare la prestazione energetica e/o il comfort visivo. Per ciascun clima considerato vengono descritte nel dettaglio tutte le strategie di controllo analizzate. Per ciascuna strategia presa in esame sono stati valutati gli effetti sulla funzione obiettivo che essa vuole ottimizzare ed anche sugli aspetti non oggetto di ottimizzazione, al fine di evidenziarne sia i vantaggi, sia le limitazioni.

4.6 Parametri di controllo

A seconda dell'obiettivo di ciascuna strategia di controllo selezionata, lo stato del vetro viene modificato in base alla variazione di parametri di controllo differenti. Di seguito sono riportati tutti i parametri monitorati considerati, a seconda della strategia e della funzione obiettivo da ottimizzare, nel controllo del componente elettrocromico.

Carichi termici di riscaldamento e raffrescamento: questo parametro è utilizzato dalle strategie che hanno come obiettivo l'ottimizzazione della prestazione energetica. Nel dettaglio, il componente elettrocromico viene portato allo stato di massima trasparenza ogni qualvolta in inverno sia presente un carico di riscaldamento, al fine di massimizzare gli apporti solari gratuiti. Al contrario, qualora sia presente un carico di raffrescamento il vetro viene portato nel suo stato meno trasparente, al fine di limitare il surriscaldamento.

Abbagliamento: questo parametro, valutato mediante la Daylight Glare Probability, è utilizzato dalle strategie che hanno come obiettivo la massimizzazione del comfort visivo. Il componente elettrocromico viene portato allo stato più trasparente tra quelli le cui proprietà termo-ottiche garantiscono un valore di DGP < 40%. Tale valore è stato scelto poiché l'abbagliamento disturbante ($40 \leq \text{DGP} < 45\%$) e l'abbagliamento perturbatore ($\text{DGP} \geq 45\%$) impediscono del tutto lo svolgimento del compito visivo, mentre l'abbagliamento percepibile ($35 \leq \text{DGP} < 40\%$) lo limita solamente.

Illuminamento verticale esterno (E_v): questo parametro è utilizzato dalle strategie che hanno come obiettivo la massimizzazione del comfort visivo. Tale parametro di controllo è spesso utilizzato in letteratura per controllare indirettamente l'abbagliamento senza dover calcolare il DGP. Infatti, il peso computazionale del calcolo di quest'ultimo è elevato, mentre invece il processo di calcolo per l'illuminamento verticale risulta molto più agevole. Il vetro viene quindi portato ad un diverso stato in funzione del valore di illuminamento verticale esterno registrato. In letteratura sono presenti diverse serie di valori di illuminamenti per i quali far variare le proprietà termo-ottiche del componente. Spesso questi set di valori derivano da analisi sperimentali in campo. Rispetto al calcolo del DGP, l'illuminamento esterno risulta meno preciso, e quindi meno efficace nel prevenire fenomeni di abbagliamento. Di conseguenza le strategie di controllo che utilizzano questo parametro per controllare il vetro elettrocromico garantiscono di norma un livello di comfort visivo inferiore a quelle che utilizzano direttamente il DGP.

Profilo di occupazione: l'operazione del componente elettrocromico risulta talvolta vincolata al profilo di occupazione dell'ambiente preso in esame. Più in dettaglio è possibile affermare che, mentre le strategie di controllo finalizzate all'ottimizzazione energetica sono indipendenti dal profilo di occupazione, quelle mirate alla massimizzazione del comfort visivo sono sempre legate all'occupazione di un ambiente. Infatti, spesso queste ultime, al fine di garantire il più alto livello di comfort visivo possibile, portano il vetro in stati di colorazione che risultano sfavorevoli per la minimizzazione del fabbisogno energetico. Risulta quindi conveniente in questi casi limitare la massimizzazione del comfort visivo ai momenti in cui l'ambiente è effettivamente occupato, passando poi per il resto del tempo ad una condizione stazionaria del vetro oppure a strategie di controllo mirate a minimizzare il fabbisogno energetico.

4.7 Risultati

4.7.1 Risultati simulazioni numeriche – Torino

Le strategie di controllo investigate per il clima di Torino sono state selezionate a partire dall'analisi delle prestazioni energetiche e di comfort visivo relative ad ogni singolo stato che il componente elettrocromico può assumere (figura 15).

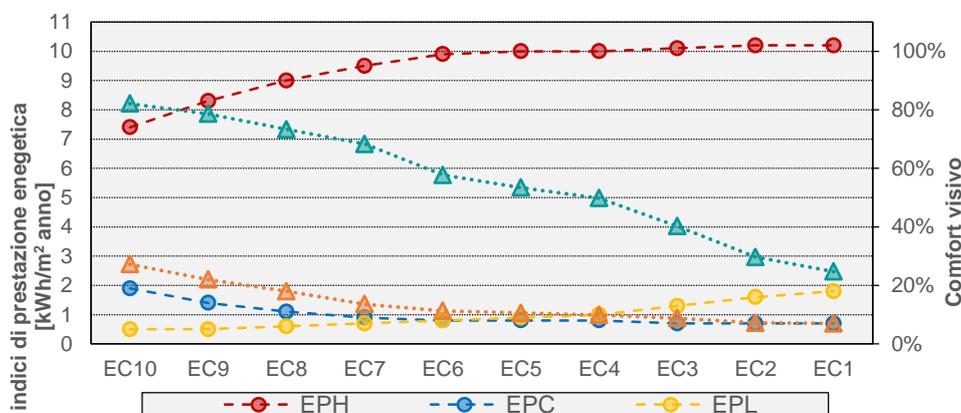


Figura 15. Prestazione energetica e di comfort visivo annuali per i 10 stati di colorazione che il componente elettrocromico può assumere.

È possibile notare come lo stadio per cui l'indice di prestazione energetica per riscaldamento è minimo sia, come era lecito aspettarsi, quello più trasparente (EC10). Per questo stadio si ha anche il fabbisogno energetico per illuminazione artificiale minore. La minimizzazione del fabbisogno energetico per raffrescamento avviene invece per lo stadio del vetro più scuro (EC1). Tuttavia dai risultati si evince che la minimizzazione di quest'ultimo abbia un effetto negativo sul fabbisogno energetico per illuminazione artificiale, il quale infatti cresce al diminuire della trasparenza del vetro. Risulta quindi più vantaggioso considerare gli indici di prestazione energetica per raffrescamento e per illuminazione in maniera congiunta (EP_{C+L}), in quanto sono altamente interdipendenti tra loro, e minimizzare quindi la loro somma. Lo stadio del componente elettrocromico per cui ciò avviene risulta essere EC6, è cioè uno stadio con colorazione intermedia. Per questo stadio di colorazione i fabbisogni di energia per raffrescamento ed illuminazione si equivalgono, mentre il fabbisogno di energia per riscaldamento e il DGP tendono a stabilizzarsi, non mostrando più variazioni significative per stadi del componente con trasparenza inferiore. Le strategie di controllo investigate per il clima di Torino, selezionate o modificate in base alle osservazioni di cui sopra, sono presentate di seguito.

ML_1: Minimizzazione dei carichi termici. Il componente elettrocromico è portato allo stato di massima trasparenza (EC10) in presenza di un carico di riscaldamento, mentre in presenza di un carico di raffrescamento è portato allo stato di massima colorazione (EC 1).

ML_6: Minimizzazione dei carichi termici. Il componente elettrocromico è portato allo stato di massima trasparenza (EC10) in presenza di un carico di riscaldamento, mentre in presenza di un carico di raffrescamento è portato allo stato di colorazione EC6, il quale, come visto, minimizza la somma dei fabbisogni energetici per raffrescamento ed illuminazione.

MG_L_1: Minimizzazione dell'abbagliamento. Ogni qualvolta venga registrato un valore di $DGP > 40\%$ (abbagliamento disturbante) il componente elettrocromico viene portato allo stato più trasparente tra quelli le cui proprietà termo-ottiche garantiscono un valore di DGP inferiore alla soglia di 40%.

MG_L_1_i: Minimizzazione dell'abbagliamento e, dove ciò non sia possibile, minimizzazione del fabbisogno energetico. La figura 16 mostra il profilo annuale di DGP per gli stati più trasparente (EC10) e meno trasparente (EC1) che il componente elettrocromico può assumere.

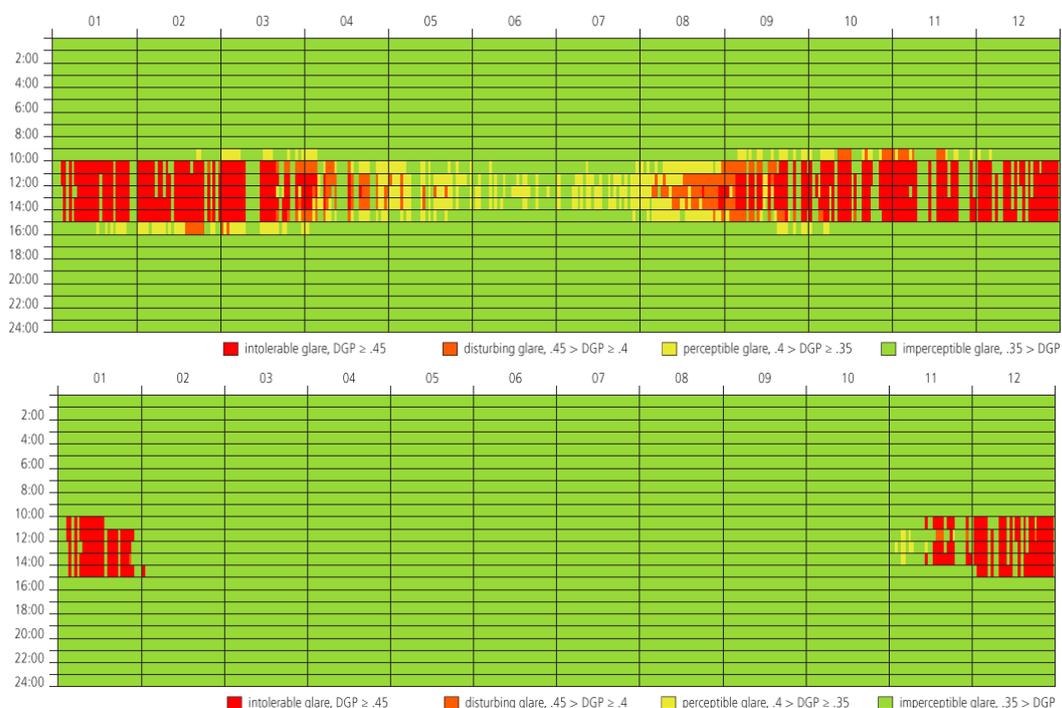


Figura 16. Daylight Glare Probability per vetro elettrocromico allo stato di massima trasparenza (sopra) e di massima colorazione (sotto).

È possibile notare che nel periodo primaverile, autunnale ed estivo lo stato EC1 è in grado di risolvere il problema dell'abbagliamento, garantendo valori di DGP inferiori alla soglia del 40%. Ciò non risulta invece vero nella stagione invernale, nella quale anche lo stato EC1 non è in grado di prevenire il fenomeno di abbagliamento, in quanto quest'ultimo è causato dalla presenza del disco solare direttamente all'interno del campo visivo dell'occupante (nella stagione invernale l'angolo di elevazione solare risulta ridotto anche nelle ore centrali del giorno). In questo caso lo stato EC1 non solo non risolve il problema dell'abbagliamento, ma influenza negativamente anche il fabbisogno energetico globale. Infatti la disponibilità di luce naturale diminuisce sensibilmente, aumentando quindi il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale ed anche quello per il riscaldamento, in quanto come conseguenza vengono ridotti anche gli apporti solari gratuiti. Pertanto, al verificarsi delle condizioni appena descritte la presente strategia di controllo provvede a portare il vetro al suo stato più trasparente, prediligendo l'obiettivo energetico a quello visivo.

MG_L_6_i-e: Minimizzazione dell'abbagliamento e, dove ciò non sia possibile, minimizzazione del fabbisogno energetico. Questa strategia è simile alla precedente, ma con la differenza che lo stato più scuro che il componente elettrocromico può assumere corrisponde non più ad EC1, ma a EC6. Inoltre, al fine di limitare gli apporti solari nella stagione estiva, nei momenti in cui l'ambiente non è occupato dagli utenti il componente dinamico viene portato allo stato EC6.

LX_1: Minimizzazione dell'abbagliamento. Le proprietà termo-ottiche del componente elettrocromico sono variate in maniera lineare al variare dell'illuminamento verticale esterno (E_v) nell'intervallo 30000 lx – 50000 lx. La tabella 5 riporta i valori di illuminamento associati ad ognuno dei dieci stati di colorazione del componente in esame.

LX_6: Minimizzazione dell'abbagliamento. Strategia simile alla precedente, ma con la differenza che lo stato di colorazione massima che il componente elettrocromico può assumere è limitato a EC6. Di conseguenza anche i valori di soglia dell'illuminamento verticale per ciascuno stato che il componente può assumere sono stati modificati. La tabella 5 riporta i valori di illuminamento associati a ciascuno degli stati di colorazione del componente in esame.

Stadio EC	LX_1	LX_6
EC10	$E_v < 30000$ lx	$E_v < 30000$ lx
EC9	$E_v \geq 30000$ lx	$E_v \geq 30000$ lx
EC8	$E_v \geq 32500$ lx	$E_v \geq 36667$ lx
EC7	$E_v \geq 35000$ lx	$E_v \geq 43333$ lx
EC6	$E_v \geq 37500$ lx	$E_v \geq 50000$ lx
EC5	$E_v \geq 40000$ lx	-
EC4	$E_v \geq 42500$ lx	-
EC3	$E_v \geq 45000$ lx	-
EC2	$E_v \geq 47500$ lx	-
EC1	$E_v \geq 50000$ lx	-

Tabella 5. Valori di soglia di illuminamento verticale (E_v) per ciascuno degli stati di colorazione che il componente elettrocromico può assumere nelle strategie LX_1 e LX_6.

U62/30_B_I: Minimizzazione dell'abbagliamento. Una veneziana interna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°) è utilizzata in coppia con il vetro selettivo ad alte prestazioni (U62/30), e cioè con $T_{vis} = 0.62$ e $g = 0.3$. Le lamelle sono ruotate all'inclinazione necessaria a mantenere il valore di DGP sotto la soglia del 40%.

V72/38_B_I: Minimizzazione dell'abbagliamento. Questa strategia è del tutto simile alla precedente, con l'unica differenza che viene accoppiato alla veneziana il vetro selettivo dalle prestazioni standard (V72/38), e cioè $T_{vis} = 0.72$ e $g = 0.38$.

ML_1_B_I: Minimizzazione dei carichi termici con intervallo di variazione del componente elettrocromico da EC10 ad EC1 e minimizzazione dell'abbagliamento con veneziana interna con

lamelle orientabili (0°, 15°, 30°). La minimizzazione dei carichi termici di riscaldamento e raffrescamento è effettuata con le stesse modalità descritte per la strategia ML_1. Inoltre è stata aggiunta una veneziana interna al fine di controllare l'abbagliamento: le sue lamelle vengono infatti ruotate all'inclinazione necessaria a mantenere il valore di DGP sotto la soglia del 40%.

ML_6_B_I: Minimizzazione dei carichi termici con intervallo di variazione del componente elettrocromico da EC10 ad EC6 e minimizzazione dell'abbagliamento con veneziana interna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°). Questa strategia è simile alla precedente, ma la minimizzazione dei carichi termici viene effettuata secondo le modalità descritte per la strategia di controllo ML_6.

I risultati relativi a prestazione energetica e comfort visivo per l'occupante, relativi a ciascuna strategia di controllo considerata, sono stati comparati a quelli ottenuti per i vetri statici selettivi e per quelli relativi al componente elettrocromico mantenuto fisso per tutto l'anno su 4 diversi stadi. Di seguito la nomenclatura utilizzata per questi casi:

U62/30: vetrocamera con vetro selettivo ad alte prestazioni

V72/38: vetrocamera con vetro selettivo dalle prestazioni standard

EC1, EC4, EC7, EC10: componente elettrocromico mantenuto per tutto l'anno rispettivamente al suo stadio meno trasparente (EC1), a due stadi intermedi (EC4, EC7), ed al suo stadio più trasparente (EC10).

4.7.1.1 Prestazione energetica

In figura 17 sono presentati gli indici di prestazione energetica per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione artificiale ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino.

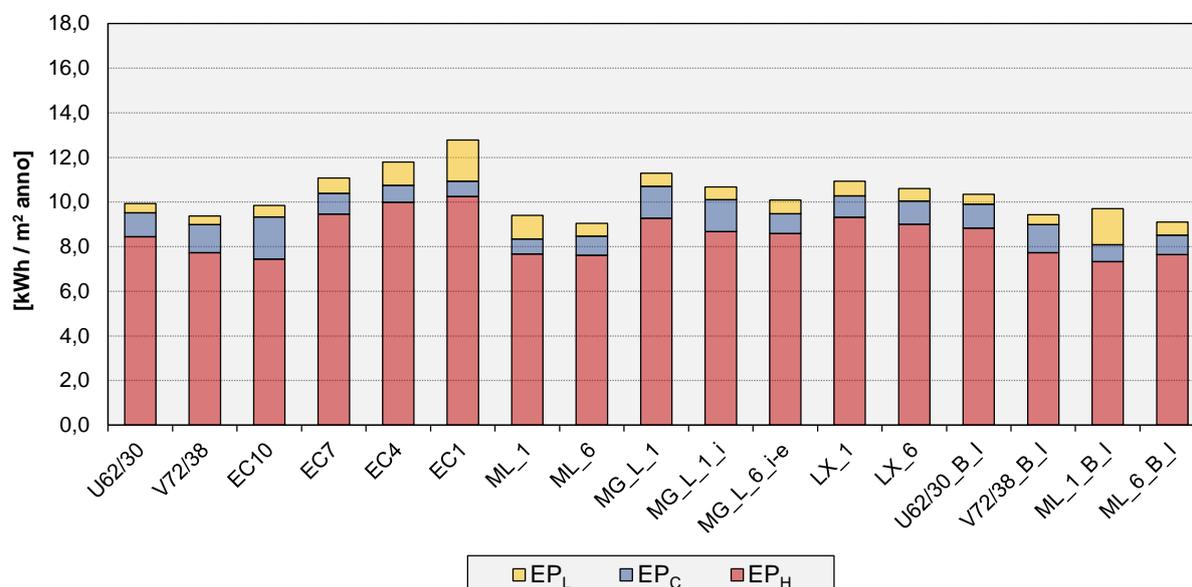


Figura 17. Indice di prestazione energetica per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino.

Dall'osservazione dei risultati ottenuti è possibile innanzitutto notare che, come era lecito aspettarsi per questo tipo di clima, l'indice di prestazione energetica per il riscaldamento risulta preponderante rispetto a quelli per il raffrescamento e l'illuminazione nella definizione dell'indice di prestazione energetica globale. Per quanto riguarda EP_C ed EP_L, è possibile osservare che questi parametri sono interdipendenti e contrastanti l'uno con l'altro. Infatti, ad una diminuzione del valore di EP_C, dovuta

all'operazione del componente elettrocromico in uno stato meno trasparente o alla presenza di veneziane, corrisponde sempre un aumento del valore di EP_L , dovuto alla necessità di attivare per più tempo l'impianto di illuminazione, in quanto la minor disponibilità di luce naturale non è sufficiente a garantire il requisito minimo di illuminamento sul piano di lavoro. Questo fenomeno può essere osservato confrontando fra loro ML_1 e ML_6 o anche ML_1_B_I ed ML_6_B_I. Una diminuzione dei consumi energetici è ottenibile quindi non minimizzando solamente il valore di EP_C o EP_L , ma considerando insieme questi due parametri e minimizzando la loro somma (EP_{C+L}). È così possibile spiegare la ragione per cui le strategie di minimizzazione dei carichi termici dove lo stadio limite è uno stato di colorazione intermedio del componente elettrocromico sono più efficaci di quelle in cui il vetro viene portato fino al suo stato meno trasparente.

Dall'analisi dei risultati non si osserva un netto miglioramento legato all'operazione del componente elettrocromico mediante le diverse strategie di controllo prese in esame. Per le strategie ML_1, ML_6 e ML_6_B_I sono stati ottenuti valori di EP_{GL} di poco inferiori rispetto a quelli relativi al vetro selettivo ad alte prestazioni U62/30. Rispetto a quest'ultimo caso le strategie citate mostrano tutte un valore di EP_C inferiore ed un valore di EP_L più alto. Per tutte le altre strategie di controllo analizzate è stato ottenuto un valore di EP_{GL} più alto rispetto a quello ottenuto per U62/30. Per quanto riguarda l'utilizzo di veneziane per la riduzione dell'abbagliamento, tutti i casi analizzati mostrano EP_{GL} maggiori rispetto agli stessi casi senza veneziane. È importante tuttavia sottolineare che, come spiegato in precedenza, alcune delle strategie considerate sono mirate all'ottimizzazione del solo comfort visivo, non considerando in alcun modo i carichi termici di riscaldamento e raffrescamento. Per questo tipo di strategie è quindi normale registrare dei valori elevati per gli indici di prestazione energetica analizzati.

In senso assoluto la strategia di controllo per il componente elettrocromico più performante dal punto di vista energetico risulta essere la ML_6, mirata alla minimizzazione dei carichi termici tramite una modulazione del componente dallo stato EC10 ad EC6. È le strategie di controllo energeticamente più efficaci risultano essere quelle mirate alla minimizzazione dei carichi termici, mentre le strategie mirate alla minimizzazione del DGP, sebbene meno performanti, mostrano una variazione di EP_{GL} significativa a seconda dello stadio di minima trasparenza utilizzato per il componente elettrocromico. Le strategie mirate alla riduzione dell'abbagliamento tramite il controllo dell'illuminamento verticale esterno mostrano valori di EP_{GL} elevati, e soprattutto una minima variazione di questo parametro al variare dello stato limite di trasparenza del componente.

L'analisi dei carichi di picco registrati durante l'anno per i vetri statici e le strategie di controllo investigate (tabella 6) conferma le considerazioni fatte in precedenza per l'analisi degli indici di prestazione energetica.

I carichi di riscaldamento maggiori si registrano per tutti i casi in cui viene utilizzato uno dei due vetrocamera statici tradizionali, con o senza veneziana interna. I valori più bassi sono invece relativi alle strategie di controllo ML_1_B_I ed ML_6_B_I. La variazione di questo parametro dal valore minimo a quello massimo registrati risulta comunque ridotta. Per quanto riguarda i carichi di raffrescamento, i valori più alti risultano relativi al componente elettrocromico fisso nel suo stato EC10 per tutto l'anno ed alle strategie di controllo mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento tramite valutazione del DGP (MG_L_1 ed MG_L_1_i). I valori più bassi si registrano invece per le strategie mirate appunto alla minimizzazione dei carichi, e cioè ML_1, ML_6 ed ML_1_B_I. I carichi per l'illuminazione risultano invece per tutti i casi analizzati equivalenti alla potenza massima dell'impianto. Ciò si può spiegare se si considera che il profilo di occupazione dell'ufficio cellulare prevede in inverno ore di occupazione per le quali il sole è già tramontato. In questi casi l'impianto di illuminazione deve funzionare alla sua massima capacità per garantire sul piano di lavoro il requisito minimo di 500 lx, risultando quindi in un carico sulla rete elettrica pari alla potenza massima dell'impianto.

Per la maggior parte dei casi analizzati con vetri tradizionali statici (selettivi o stadi del componente elettrocromico) il carico massimo sulla rete elettrica (Q_{C+L}) coincide con il carico massimo relativo al solo raffrescamento Q_C , i due si verificano cioè nello stesso momento dell'anno ed hanno lo stesso

valore. Ciò significa che in questi casi il carico di picco per raffrescamento avviene in momenti in cui gli apporti solari sono tali da garantire anche il requisito minimo di illuminamento sul piano di lavoro. Tuttavia per alcune strategie di controllo i carichi di picco Q_C e Q_{C+L} non sono contemporanei, oppure se lo sono non risultano uguali come valori. Ciò significa che in questi casi le strategie di controllo sono efficaci nel ridurre il carico di picco elettrico dovuto al raffrescamento, il quale infatti risulta inferiore ai valori massimi registrati per diverse soluzioni statiche. Per ridurre tale carico il vetro elettrocromico viene parzialmente o totalmente scurito al fine di limitare gli apporti solari, e di conseguenza il carico dell'impianto di illuminazione è maggiore di zero. Questo fenomeno avviene sia per le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici (ML_1, ML_6), sia per quelle mirate all'ottimizzazione del comfort visivo (MG_L_1, MG_L_1_i, MG_L_6_i-e). Da questo punto di vista la strategia più efficace, per la quale è stato ottenuto il valore più basso di Q_{C+L} , risulta di nuovo essere la ML_1.

	Data e ora	Q_H [W _e /m ²]	Data e ora	Q_C [W _e /m ²]	Data e ora	Q_L [W _e /m ²]	Data e ora	Q_{C+L} [W _e /m ²]
U62/30	10/12 10:00	150.81	03/08 14:00	24.57	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	24.57
V72/38	10/12 10:00	150.51	03/08 14:00	26.09	01/01 19:00	7.00	07/08 14:00	26.31
EC10	10/12 10:00	145.24	03/08 14:00	32.45	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	33.85
EC7	10/12 10:00	146.23	03/08 14:00	20.18	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	20.18
EC4	10/12 10:00	146.05	03/08 14:00	20.30	01/01 19:00	7.00	02/08 14:00	20.54
EC1	10/12 10:00	146.10	03/08 14:00	19.37	01/01 19:00	7.00	03/08 13:00	22.10
ML_1	10/12 10:00	145.24	03/08 14:00	18.70	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	21.36
ML_6	10/12 10:00	145.24	03/08 14:00	21.15	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	22.55
LX_1	10/12 10:00	145.25	03/08 13:00	21.45	01/01 19:00	7.00	07/08 13:00	24.46
LX_6	10/12 10:00	145.25	03/08 14:00	22.66	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	24.06
MG_L_1	10/12 10:00	145.44	03/08 13:00	29.16	01/01 19:00	7.00	03/08 13:00	30.56
MG_L_1_i	10/12 10:00	145.24	03/08 13:00	29.16	01/01 19:00	7.00	03/08 13:00	30.56
MG_L_6_i-e	10/12 10:00	145.24	03/08 14:00	21.07	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	22.47
U62/30_B_I	10/12 10:00	150.81	03/08 14:00	26.56	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	26.56
V72/38_B_I	10/12 10:00	150.71	03/08 13:00	25.33	01/01 19:00	7.00	07/08 13:00	26.10
ML_1_B_I	10/12 10:00	144.70	03/08 14:00	19.37	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	24.76
ML_6_B_I	10/12 10:00	145.24	03/08 14:00	21.20	01/01 19:00	7.00	03/08 14:00	22.60

Tabella 6. Carichi di picco per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino.

4.7.1.2 Comfort visivo

In figura 18 sono presentati i risultati relativi agli indici di comfort visivo, e cioè Daylight Autonomy (DA) e Daylight Glare Probability (DGP), ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino. Per quanto riguarda il DGP, indice che quantifica l'abbagliamento dovuto alla luce naturale, è stato valutato il rischio annuale di abbagliamento disturbante o intollerabile, corrispondente alla percentuale di ore occupate in cui il DGP è maggiore di 40%.

Osservando i risultati relativi ai componenti statici analizzati è possibile notare che maggiore è la loro trasparenza e maggiore è la DA, in quanto aumenta la disponibilità di luce naturale durante l'anno. Contemporaneamente però, a componenti con trasparenza maggiore è associato anche un più alto valore di DGP > 40%, in quanto una maggiore disponibilità di luce naturale implica un più alto rischio di abbagliamento disturbante o intollerabile. I risultati migliori dal punto di vista del comfort visivo sono ottenuti per le strategie mirate a minimizzare il fenomeno di abbagliamento attraverso il

controllo del DGP, e cioè M_GL_1, MG_L_1_i ed MG_L_6_i-e. Tra queste poi, la prestazione migliore risulta quella relativa alla strategia MG_L_1_i, per la quale è stato ottenuto il valore di DA più alto in assoluto, a cui è associato un valore di DGP>40% ben al di sotto del 10%. Ciò significa che attraverso questa strategia di controllo è possibile massimizzare la disponibilità di luce naturale in ambiente senza per questo aumentare il rischio di abbagliamento per l'utente. Una buona prestazione è stata ottenuta anche per i due vetrocamera selettivi accoppiati alla veneziana mobile. Per le strategie mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento tramite il controllo dell'illuminamento verticale esterno sono stati ottenuti valori di DA inferiori rispetto alle altre strategie fin qui descritte, ma comunque accettabili. La stessa cosa vale per il DGP>40%, per il quale si registrano valori più alti, ma sempre al di sotto del 10%. Le strategie di controllo per le quali sono stati ottenuti i risultati peggiori sono quelle mirate alla minimizzazione dei carichi termici, con e senza veneziana interna. In dettaglio, per le strategie di controllo LM_1_B_I e LM_6_B_I, grazie all'operazione della veneziana mobile sono stati ottenuti valori di DGP>40% molto bassi. Inoltre, per la LM_6_B_I il valore di DA è maggiore di quello ottenuto per le strategie LX_1 e LX_2. Per la strategia LM_1_B_I invece la DA è decisamente più bassa rispetto a quella ottenuta per le altre strategie finora descritte. Per quanto riguarda le strategie LM_1 e LM_6, esse sono quelle che garantiscono il peggior livello di comfort visivo all'utente. Infatti i valori di DGP>40% ottenuti per queste due strategie sono i più alti in assoluto tra tutte le strategie di controllo analizzate. Considerando la DA invece, il valore ottenuto per la strategia LM_6 risulta comparabile a quello ottenuto per le strategie LX_1 e LX_2, mentre per quanto riguarda la DA ottenuta per la strategia LM_1, questa è la più bassa ottenuta per una strategia di controllo, comparabile solo a quella relativa alla strategia ML_1_B_I. Dai risultati ottenuti è quindi possibile concludere che le strategie di controllo migliori dal punto di vista energetico risultano poco efficaci nel garantire un livello adeguato di comfort visivo all'occupante. Tra queste le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici risultano migliori dal punto di vista energetico e meno efficaci dal punto di vista di comfort visivo.

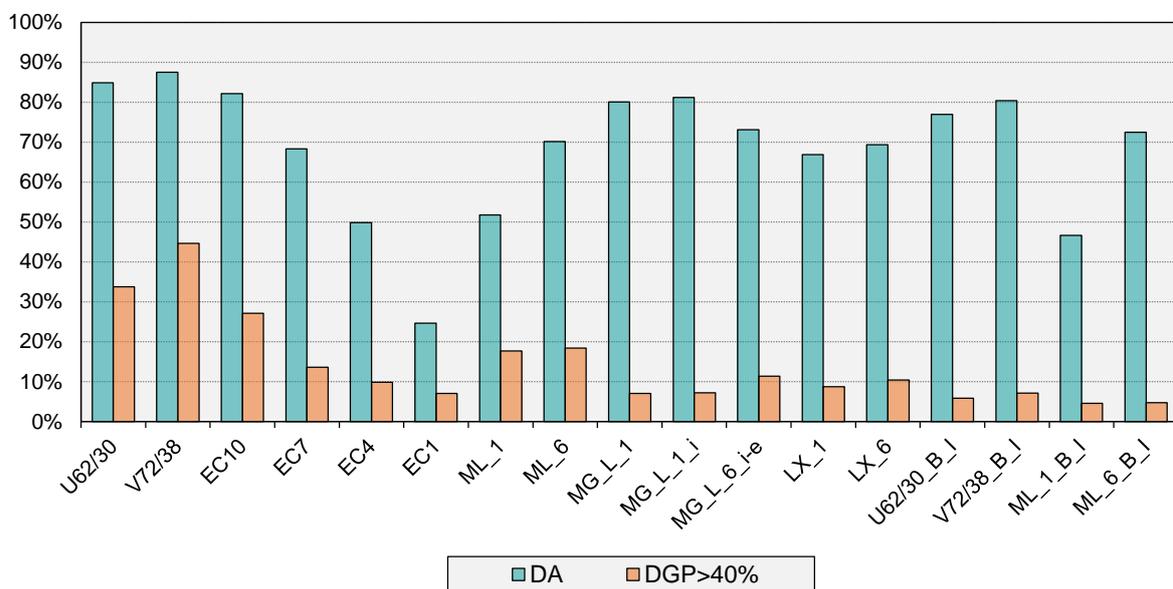


Figura 18. Daylight Autonomy (DA) e Daylight Glare probability (DGP) ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino.

Nella figura 19 vengono correlati tra loro abbagliamento, espresso questa volta come percentuale del periodo di occupazione durante l'anno nella quale esso risulta impercettibile o al massimo percepibile (DGP<40%) e la disponibilità di luce naturale, espressa nuovamente tramite la Daylight Autonomy.

La posizione teorica migliore all'interno del grafico si trova nel punto in alto a destra, per il quale è massimizzata la penetrazione di luce naturale mentre il rischio di abbagliamento è nullo. È possibile notare come i punti che rappresentano le prestazioni dei vetri statici analizzati (selettivi e tutti i singoli stati del componente elettrocromico) formano una linea curva dall'andamento ben definito. Questa curva definisce una relazione tra la trasparenza del vetro statico e i relativi valori di DA e $DGP < 40\%$. All'aumentare della trasparenza di quest'ultimo aumentano sia la DA che il rischio di abbagliamento. Viceversa, ad una diminuzione della trasparenza del vetro statico sono associati un minor rischio di abbagliamento ed una minore disponibilità di luce naturale. La prestazione di un qualsiasi vetro statico si troverà sempre sulla curva sopra definita. Al contrario, la prestazione di un componente dinamico, il quale è in grado di adattare le proprie proprietà termo-ottiche alle condizioni ambientali esterne, può non trovarsi sulla curva descritta poc'anzi, tendendo a spostarsi, in diversa misura, verso il punto di ottimo ideale in alto a sinistra. Il grado di spostamento dalla curva dei vetri statici è determinato dall'efficacia della strategia di controllo utilizzata per far variare le proprietà termo-ottiche del componente in esame.

Osservando il grafico è possibile notare come le considerazioni fatte in precedenza relativamente alla prestazione delle strategie di controllo analizzate siano confermate. Infatti le strategie di controllo più vicine all'ottimo teorico (punto in alto a destra), sono le strategie di controllo del componente elettrocromico mirate alla minimizzazione del fenomeno di abbagliamento tramite un controllo del DGP (MG_L_1, c) e le strategie di controllo per le veneziane accoppiate al vetrocamera con i due vetri selettivi (U62/30_B_I e V72_38_B_I). Le strategie LX_1 e LX_2 offrono prestazioni peggiori rispetto a quelle appena citate sia dal punto di vista della disponibilità di luce naturale sia per il rischio di abbagliamento. Per le strategie ML_1_B_I e ML_6_B_I sono stati ottenuti i valori più alti di $DGP < 40\%$. Tuttavia, per la seconda il valore di DA è accettabile, anche se inferiore a quello ottenuto per altre strategie, mentre per la prima questo è decisamente basso. Le strategie ML_1 e ML_6, cioè quelle mirate alla minimizzazione dei carichi termici, sono le uniche per le quali si sia ottenuta una prestazione che si trovi addirittura al di sotto della curva dei vetri selettivi. Ciò significa che dal punto di vista del comfort visivo risulta più efficace utilizzare un vetro statico con T_{vis} compresa tra quella di EC8 e quella di EC9 piuttosto che utilizzare il componente elettrocromico controllato mediante le suddette strategie di controllo.

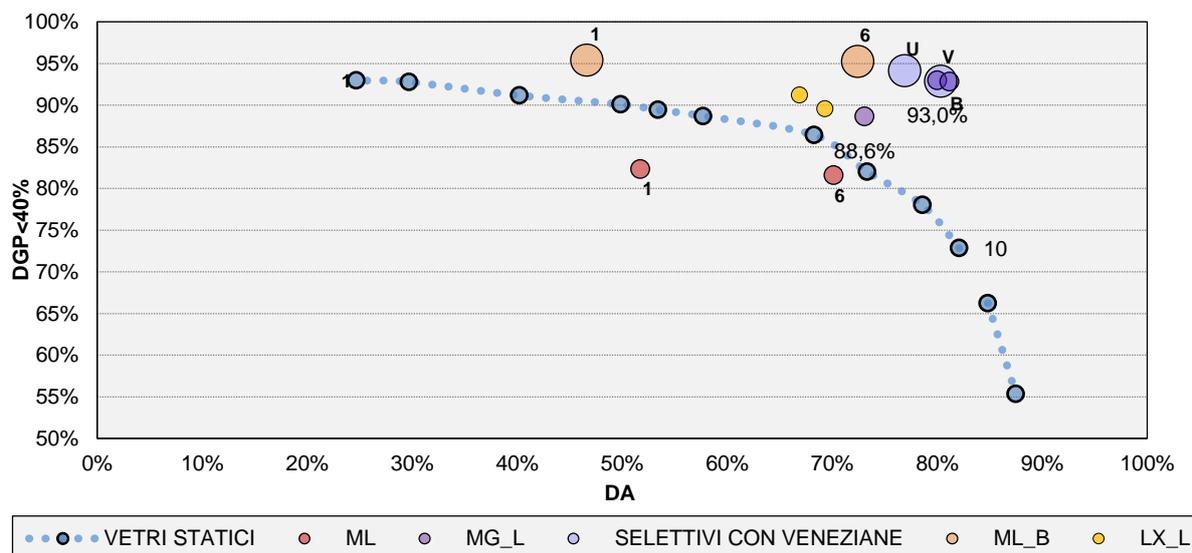


Figura 19. Correlazione di DA e $DGP < 40\%$ per le strategie di controllo esaminate nel clima di Torino.

4.7.1.3 Correlazione tra prestazione energetica e comfort visivo

Nella figura 20 vengono correlati tra loro l'abbagliamento, espresso come percentuale del periodo di occupazione durante l'anno nella quale esso risulta impercettibile o al massimo percepibile ($DGP < 40\%$) e l'indice di prestazione energetica globale (EP_{GL}).

A differenza del caso precedente, questa volta l'ottimo teorico è rappresentato dal punto in alto a sinistra, per il quale sia l'indice di prestazione energetica che il rischio di abbagliamento sono nulli. Anche in questo caso è possibile notare come i punti che rappresentano le prestazioni dei vetri statici analizzati (selettivi e tutti i singoli stati del componente elettrocromico) formano una linea curva dall'andamento ben definito. Si può osservare come anche in questo caso l'utilizzo di una strategia di controllo per un componente dinamico permetta di "spostarsi" dalla curva che definisce il comportamento dei vetri statici muovendosi verso l'ottimo teorico.

Analizzando i risultati è possibile osservare che le strategie di controllo per le quali è stata ottenuta la prestazione migliore sia relativamente all'aspetto energetico che a quello di comfort visivo sono la ML_1_B_I e la U62/30_B_I. Le strategie ML_1 e ML_6 mostrano valori simili di EP_{GL} , ma sono caratterizzate da un rischio di abbagliamento decisamente più alto. Le strategie mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento tramite il controllo del DGP sono caratterizzate appunto da un basso rischio di abbagliamento, a fronte però di un elevato valore di EP_{GL} . Le strategie LX_1 e LX_2 sono caratterizzate da una prestazione sia in ambito energetico che in quello di comfort addirittura peggiorativa rispetto a quelle relative ai componenti statici presi in esame. Come detto, dall'analisi di questi ultimi risultati le strategie più efficaci sia in termini di comfort visivo che di prestazione energetica risultano essere ML_1_B_I e la U62/30_B_I. Tuttavia, l'analisi dei risultati relativi al solo comfort visivo ha mostrato come per la strategia ML_1_B_I il basso rischio di abbagliamento sia collegato ad una altrettanto bassa disponibilità di luce naturale. Ciò non risulta invece vero per la U62/30_B_I, la quale mostra un'ottima prestazione sia in termini di DA che di $DGP < 40\%$, il che ne fa la strategia migliore in assoluto tra quelle investigate per il clima di Torino.

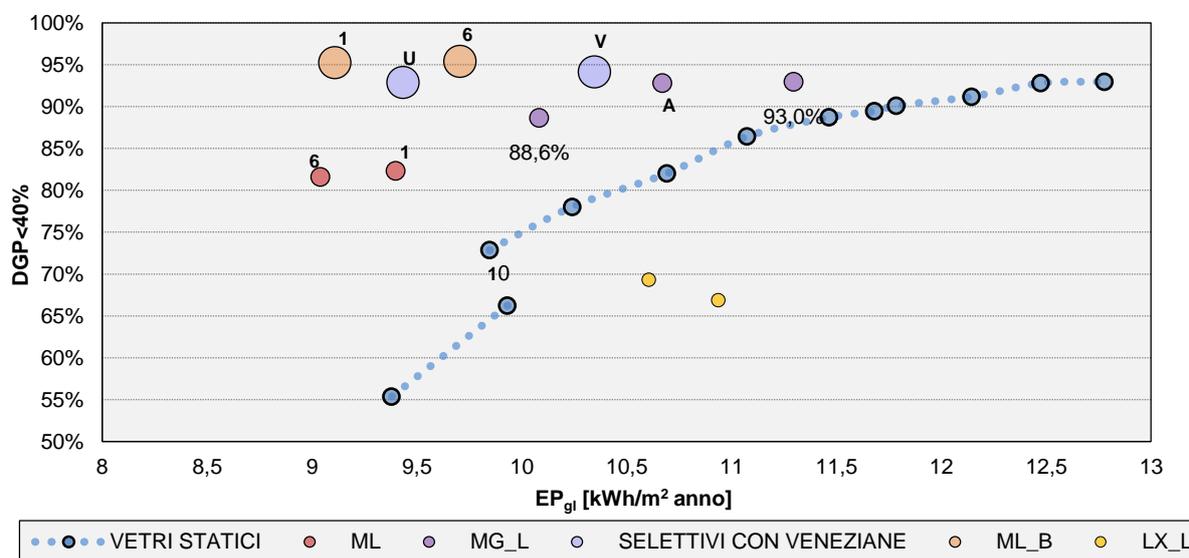


Figura 20. Correlazione di EP_{GL} e $DGP < 40\%$ per le strategie di controllo esaminate nel clima di Torino.

4.7.2 Risultati simulazioni numeriche – Roma

Le strategie di controllo investigate per il clima di Roma sono state selezionate e/o modificate considerando le caratteristiche peculiari di questo clima, in modo ottimizzare la prestazione del componente elettrocromico. Pertanto, rispetto alle strategie investigate nel caso di Torino, alcune di esse sono state leggermente modificate, mentre altre non sono state del tutto considerate per questo clima. Nello specifico, le strategie di controllo considerate per il clima di Torino ma non per

quello di Roma sono la LX_1 e la LX_6, in quanto si sono dimostrate non in grado di ottimizzare la prestazione del componente elettrocromico né dal punto di vista energetico né dal punto di vista di comfort visivo. Anche le strategie MG_L_1_i e MG_L_6_i-e non sono state investigate per il clima di Roma, in quanto sostituite da strategie più adatte a quest'ultimo, e cioè MG_L_1_9 e MG_L_1_9e. Di seguito viene descritta ciascuna strategia di controllo introdotta per il clima di Roma.

ML_7: Minimizzazione dei carichi termici. Il componente elettrocromico è portato allo stato di massima trasparenza (EC10) in presenza di un carico di riscaldamento, mentre in presenza di un carico di raffrescamento è portato allo stato di colorazione EC7, il quale, come visto in precedenza, riduce la somma dei fabbisogni energetici per raffrescamento ed illuminazione.

MG_L_1_9: Minimizzazione dell'abbagliamento e riduzione dei carichi per raffrescamento. Ogni qualvolta venga registrato un valore di DGP $\geq 40\%$ (abbagliamento disturbante) il componente elettrocromico viene portato allo stato più trasparente tra quelli le cui proprietà termo-ottiche garantiscono un valore di DGP inferiore alla soglia di 40%. Inoltre, dato che, come si è visto, per tutte le strategie di questo tipo si sono ottenuti alti valori di EP_C, al fine di ridurre gli apporti solari e quindi l'indice di prestazione energetica per raffrescamento il componente elettrocromico viene portato allo stato di colorazione EC9 in presenza di carichi di raffrescamento.

MG_L_1_9e: Minimizzazione dell'abbagliamento e riduzione dei carichi per raffrescamento. Strategia simile alla precedente, con la differenza che, per ridurre ulteriormente gli apporti solari e i carichi di raffrescamento ad essi associati sono stati adottati due ulteriori accorgimenti,. Nel periodo estivo lo stato massimo di trasparenza consentito per il componente elettrocromico corrisponde allo stato EC9 (e non EC10). Inoltre, nello stesso periodo, quando l'ufficio non è occupato il componente è portato al suo stato di minima trasparenza (EC1).

4.7.2.1 Prestazione energetica

In figura 21 sono presentati gli indici di prestazione energetica per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione artificiale ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Roma.

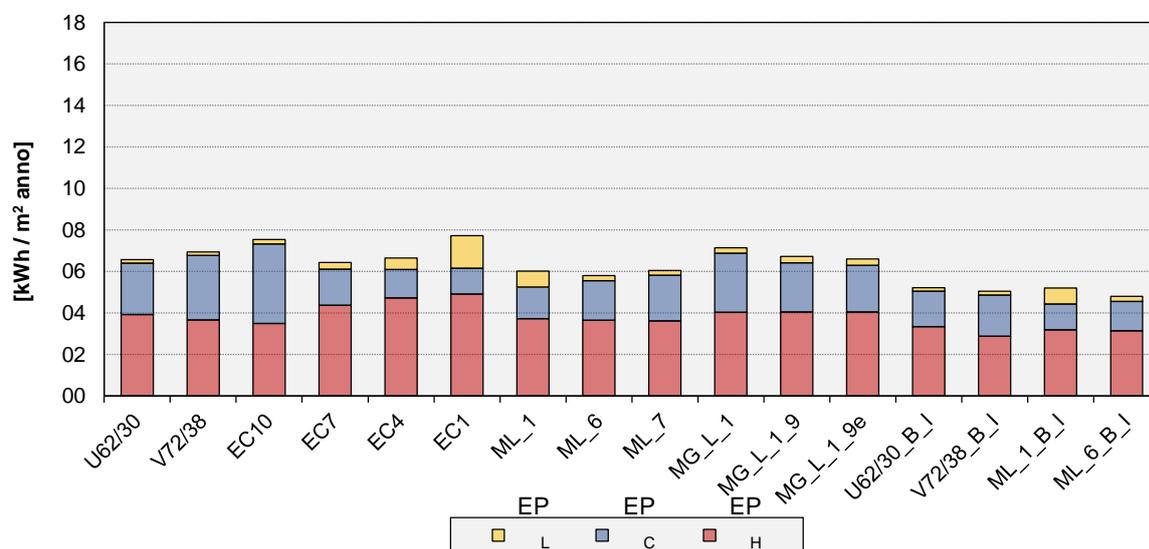


Figura 21. Indice di prestazione energetica per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Roma.

Dall'osservazione dei risultati è possibile innanzitutto notare che per il clima di Roma l'indice di prestazione energetica per il riscaldamento è solamente di poco maggiore rispetto a quello per il raffrescamento nella definizione dell'indice di prestazione energetica globale.

Rispetto ai componenti statici, e cioè i vetri selettivi o il componente elettrocromico tenuto fisso per tutto l'anno negli stati EC1 EC4, EC7 ed EC10, le strategie di controllo analizzate mostrano nella maggior parte dei casi, a differenza di quanto avveniva per Torino, di essere in grado di ridurre l' EP_{GL} . Le strategie di controllo più efficaci nella riduzione del fabbisogno energetico risultano essere quelle che contemplano l'uso di una veneziana mobile interna, accoppiata sia al componente elettrocromico che ai vetri selettivi, e cioè U62/30_B_I, V72/38_B_I, ML_1_B_I e ML_6_B_I. Nello specifico, la prestazione migliore in senso assoluto è stata ottenuta per la strategia ML_6_B_I, in quanto, come avveniva per Torino, utilizzare come stadio di colorazione massima del vetro EC6, e non EC1, risulta il miglior compromesso nella minimizzazione sia di EP_L che di EP_C . È comunque opportuno sottolineare che i valori di EP_{GL} relativi a queste quattro strategie sono tra loro molto simili. Le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici attraverso la sola modulazione di trasparenza del componente elettrocromico (ML_1, ML_6 e ML_7) mostrano di essere in grado di ridurre l'indice di prestazione energetica globale in confronto alla prestazione dei componenti statici tradizionali, anche se i valori di EP_{GL} ottenuti per queste strategie sono leggermente maggiori rispetto a quelli relativi al gruppo di strategie citato poc'anzi. Anche in questo caso la strategia che utilizza come stadio di colorazione massima del vetro EC6, e cioè ML_6, risulta la più performante dal punto di vista energetico, in quanto in grado di minimizzare la somma del fabbisogno energetico per raffrescamento e per illuminazione. Le strategie di controllo mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento (M_GL_1, M_GL_1_9 e M_GL_1_9e) risultano poco performanti dal punto di vista energetico, in quanto per esse sono stati ottenuti valori di EP_{GL} maggiori, o al massimo equiparabili, a quelli ottenuti per i componenti statici tradizionali. Tuttavia, rispetto a quanto avveniva nel caso di Torino, per il clima di Roma si registrano differenze meno marcate tra i valori di EP_{GL} relativi a questo gruppo di strategie di controllo e quelli ottenuti per i componenti statici tradizionali. Ciò è in parte dovuto al diverso tipo di clima delle due località ed in parte alle modifiche apportate alle strategie di controllo in esame, modifiche in precedenza descritte nel dettaglio, nel tentativo di limitare i carichi termici per raffrescamento. Nel paragrafo successivo verrà invece verificata la loro efficacia dal punto di vista del comfort visivo all'utente

L'analisi dei carichi di picco registrati durante l'anno per i vetri statici e le strategie di controllo investigate (tabella 7) concorda con le considerazioni fatte in precedenza per l'analisi degli indici di prestazione energetica.

I carichi di riscaldamento maggiori si registrano per i casi in cui viene utilizzato uno dei due vetrocamere statici tradizionali, mentre i valori più bassi sono invece relativi alle strategie di controllo ML_1_B_I e ML_6_B_I. La variazione di questo parametro dal valore minimo a quello massimo registrati risulta più significativa rispetto al clima di Torino (15% circa per Roma contro 3% circa per Torino).

Per quanto riguarda i carichi di raffrescamento, i valori più alti risultano relativi al componente elettrocromico fisso nel suo stato EC10 per tutto l'anno ed alle strategie di controllo mirate alla minimizzazione del dell'abbagliamento tramite valutazione del DGP (MG_L_1 e MG_L_1_9). I valori più bassi si registrano invece per le strategie mirate appunto alla minimizzazione dei carichi termici, e cioè ML_1, ML_6, ML_1_B_I e ML_6_B_I. I carichi per l'illuminazione risultano invece per tutti i casi analizzati equivalenti alla potenza massima dell'impianto. Ciò avviene, come per Torino, perché il profilo di occupazione dell'ufficio cellulare prevede in inverno ore di occupazione per le quali il sole è già tramontato, risultando quindi in una necessità di utilizzare l'impianto di illuminazione alla sua massima capacità per garantire un livello di illuminamento adeguato sul piano di lavoro. Ciò si può spiegare se si considera che il profilo di occupazione dell'ufficio cellulare prevede in inverno ore di occupazione per le quali il sole è già tramontato. In questi casi l'impianto di illuminazione deve funzionare alla sua massima capacità per garantire sul piano di lavoro il requisito minimo di 500 lx, risultando quindi in un carico sulla rete elettrica pari alla potenza massima dell'impianto.

Anche per il clima di Roma il carico massimo sulla rete elettrica (Q_{C+L}) coincide con il carico massimo relativo al solo raffrescamento (Q_C) per la maggior parte dei casi analizzati con vetri tradizionali statici (selettivi o stadi del componente elettrocromico). Ciò risulta vero anche per le strategie di

controllo mirate a minimizzare il rischio di abbagliamento, con o senza veneziana. Q_{C+L} e Q_C risultano non contemporanei, oppure se lo sono mostrano valori tra loro diversi, per tutte le strategie con l'obiettivo di minimizzare i carichi termici. Ciò significa che esse sono efficaci nel ridurre il carico di picco sulla rete elettrica per raffrescamento, il quale infatti risulta inferiore ai valori massimi registrati per diverse soluzioni statiche. Per ridurre tale carico il vetro elettrocromico viene parzialmente o totalmente scurito al fine di limitare gli apporti solari, e di conseguenza il carico dell'impianto di illuminazione è maggiore di zero, ma inferiore al valore corrispondente alla sua potenza massima. Da questo punto di vista la strategia più efficace, per la quale è stato ottenuto il valore più basso di Q_{C+L} , risulta essere la ML_1_B_I.

È interessante notare come i valori massimi e minimi per i carichi di picco di riscaldamento e raffrescamento siano stati ottenuti, relativamente al clima di Roma e di Torino, per le stesse strategie. Ciò significa che al variare del clima in esame l'efficacia delle diverse strategie di controllo analizzate rimane immutata.

	Data e ora	Q_H [W _e /m ²]	Data e ora	Q_C [W _e /m ²]	Data e ora	Q_L [W _e /m ²]	Data e ora	Q_{C+L} [W _e /m ²]
U62/30	05/01 10:00	130.97	05/10 14:00	35.49	01/01 19:00	7.00	05/10 14:00	35.49
V72/38	05/01 10:00	128.43	05/10 14:00	43.99	01/01 19:00	7.00	05/10 14:00	43.99
EC10	05/01 10:00	115.07	05/10 14:00	44.67	01/01 19:00	7.00	05/10 14:00	44.67
EC7	05/01 10:00	120.81	29/08 13:00	25.55	01/01 19:00	7.00	08/09 14:00	25.74
EC4	05/01 10:00	122.15	14/08 13:00	21.96	01/01 19:00	7.00	14/08 13:00	23.36
EC1	05/01 10:00	122.99	02/08 13:00	20.27	01/01 19:00	7.00	02/08 13:00	23.42
ML_1	05/01 10:00	115.85	14/08 13:00	20.27	01/01 19:00	7.00	02/08 13:00	23.25
ML_6	05/01 10:00	115.68	14/08 13:00	23.12	01/01 19:00	7.00	02/08 13:00	24.31
ML_7	05/01 10:00	115.53	05/10 13:00	26.15	01/01 19:00	7.00	09/10 13:00	26.31
MG_L_1	05/01 10:00	116.20	29/08 13:00	37.66	01/01 19:00	7.00	29/08 13:00	37.66
MG_L_1_9	05/01 10:00	116.20	12/09 14:00	37.10	01/01 19:00	7.00	12/09 14:00	37.10
MG_L_1_9e	05/01 10:00	116.20	29/08 13:00	32.65	01/01 19:00	7.00	29/08 13:00	32.65
U62/30_B_I	05/01 10:00	118.92	29/08 13:00	28.34	01/01 19:00	7.00	29/08 13:00	28.34
V72/38_B_I	05/01 10:00	115.81	05/10 13:00	32.05	01/01 19:00	7.00	05/10 13:00	32.05
ML_1_B_I	31/12 10:00	107.64	05/10 14:00	19.96	01/01 19:00	7.00	02/08 13:00	21.82
ML_6_B_I	05/01 10:00	110.48	02/08 13:00	20.55	01/01 19:00	7.00	02/08 13:00	21.95

Tabella 7. Carichi di picco per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Roma.

4.7.2.2 Comfort visivo

In figura 22 sono presentati i risultati relativi agli indici di comfort visivo, e cioè Daylight Autonomy (DA) e Daylight Glare probability (DGP), ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino. Per quanto riguarda il DGP, indice che quantifica l'abbagliamento dovuto alla luce naturale, è stato valutato il rischio annuale di abbagliamento disturbante o intollerabile, corrispondente alla percentuale di ore occupate in cui il DGP è maggiore di 40%.

Osservando i risultati relativi ai componenti statici analizzati è possibile notare la stessa tendenza ottenuta per il clima di Torino: ad una maggiore trasparenza del componente sono associati un più alto valore di DA ed un maggior rischio di abbagliamento disturbante o intollerabile. Nel clima di Roma sono stati ottenuti per quasi tutte le strategie di controllo valori di DA tra loro molto simili, con una variazione massima di circa il 5%. L'unica eccezione è rappresentata dalle strategie ML_1_B_I e ML_6_B_I, per le quali i valori di DA ottenuti sono sensibilmente inferiori a quelli delle altre strategie di controllo. A queste ultime strategie è però associato il più basso valore di DGP>40% ottenuto per

tutti i casi analizzati. Tutte le altre strategie di controllo mostrano valori di questo parametro diversi tra loro, ma sempre al di sotto del 10%. Ciò non risulta vero solo per le tre strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici, e cioè ML_1, ML_6 e ML_7, per le quali i valori di DGP>40% ottenuti sono compresi tra un minimo o di 15% circa ed un massimo di 20% circa. Valutando il comfort visivo nel suo insieme, considerando cioè sia DA che DGP>40%, le prestazioni migliori sono state ottenute dai vetri selettivi accoppiati con una veneziana mobile interna (U62/30_B_I, V72/38_B_I). Per questi casi è stato ottenuto un elevato valore di DA ed un valore di DGP>40% inferiore al 5%. Molto buone risultano anche le prestazioni delle strategie di controllo per il componente elettrocromico mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento; per queste ultime si ottengono valori di DA analoghi alle strategie U62/30_B_I e V72/38_B_I, associati però ad un più alto rischio di abbagliamento. Le strategie che risultano meno efficaci nel garantire un adeguato livello di comfort visivo per l'utente sono quelle mirate alla minimizzazione dei carichi termici. Per queste ultime un valore di DA simile a quello ottenuto nelle strategie analizzate in precedenza è associato, come visto, ad un rischio di abbagliamento significativamente elevato.

Dai risultati ottenuti è quindi possibile concludere che, anche per il clima di Roma, le strategie di controllo più performanti dal punto di vista energetico risultano poco efficaci nel garantire un livello adeguato di comfort visivo all'occupante. Tra queste le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici risultano quelle più performanti dal punto di vista energetico e meno efficaci dal punto di vista di comfort visivo.

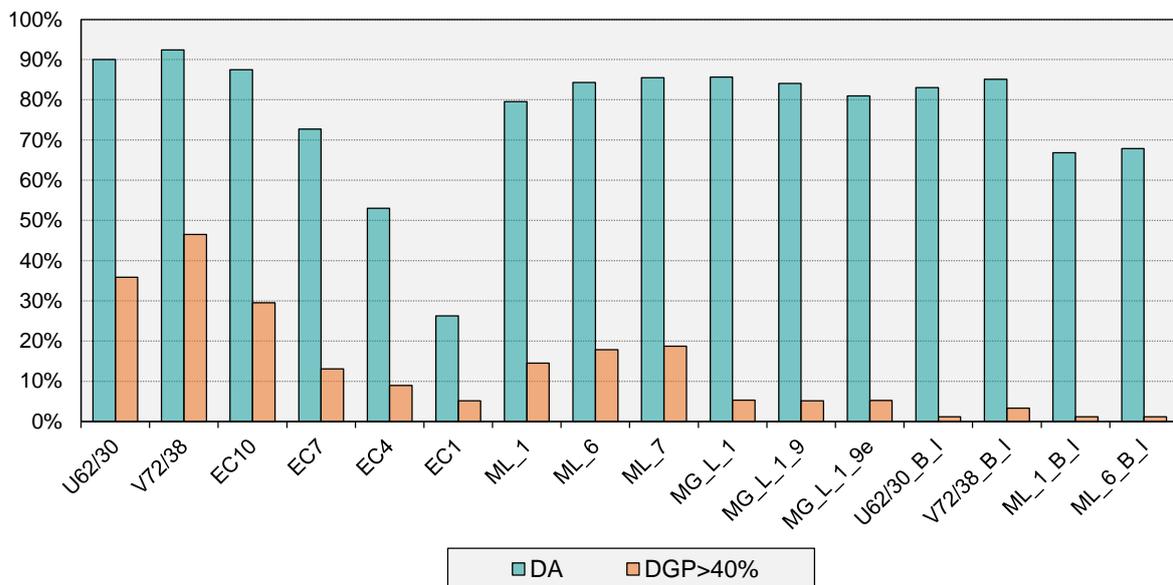


Figura 22. Daylight Autonomy (DA) e Daylight Glare probability (DGP) ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Roma.

Nella figura 23 vengono correlati tra loro abbagliamento, espresso questa volta come percentuale del periodo di occupazione durante l'anno nella quale esso risulta impercettibile o al massimo percepibile (DGP<40%) e la disponibilità di luce naturale, espressa nuovamente tramite la Daylight Autonomy.

Si ricorda che l'ottimo teorico di questo grafico è rappresentato dal punto in alto a destra, per il quale è massimizzata la penetrazione di luce naturale a fronte di un rischio di abbagliamento nullo. Osservando il grafico è possibile notare che la curva che definisce le prestazioni dei vetri statici risulta avere un andamento simile a quello osservato per lo stesso tipo di curva a Torino. Inoltre, le considerazioni fatte in precedenza relativamente alla prestazione delle strategie di controllo analizzate risultano confermate. Infatti le strategie di controllo più vicine all'ottimo teorico sono quelle mirate alla minimizzazione del rischio di abbagliamento per un vetro selettivo tramite l'utilizzo di una veneziana mobile (U62/30_B_I e V72/38_B_I). Le strategie mirate alla

minimizzazione del rischio di abbagliamento tramite il controllo del DGP mostrano valori simili alle strategie precedenti in termini di DA, ma valori inferiori in termini di DGP<40%. Al contrario, rispetto alle strategie più performanti, le strategie ML_1_B_I e ML_6_B_I mostrano valori affini per quanto riguarda il rischio di abbagliamento, ma valori inferiori in termini di DA. Differentemente rispetto a quanto avveniva per il caso di Torino, per il clima di Roma le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici (ML_1, ML_6 e ML_7) mostrano una prestazione, in termini di comfort visivo, migliore rispetto a quella definita dalla curva di prestazione dei vetri statici. Ciò nonostante queste ultime risultano le meno efficaci, rispetto a tutte le strategie di controllo analizzate, per garantire un livello ottimale di comfort visivo all'utente.

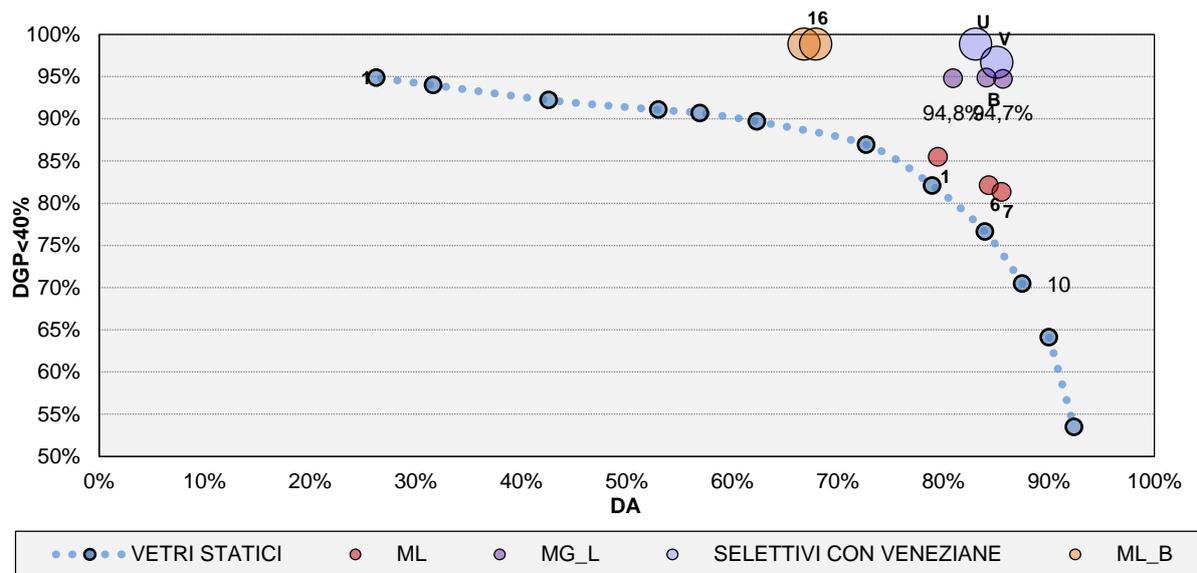


Figura 23. Correlazione di DA e DGP<40% per le strategie di controllo esaminate nel clima di Roma.

4.7.2.3 Correlazione tra prestazione energetica e comfort visivo

Nella figura 24 vengono correlati tra loro l'abbagliamento, espresso come percentuale del periodo di occupazione durante l'anno nella quale esso risulta impercettibile o al massimo percepibile (DGP<40%) e l'indice di prestazione energetica globale (EP_{GL}).

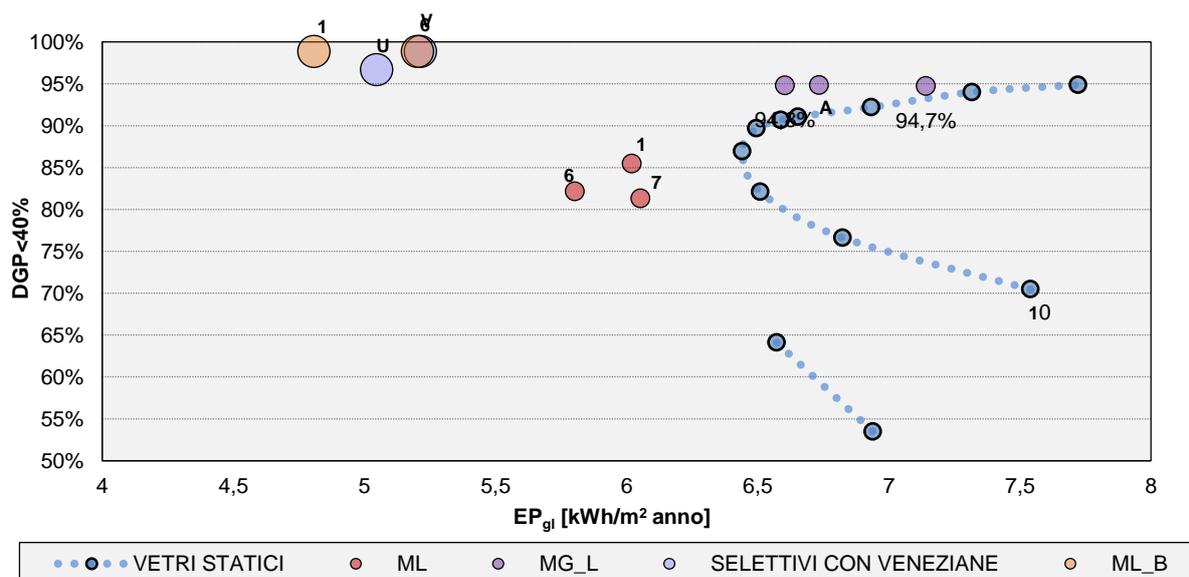


Figura 24. Correlazione di EP_{GL} e DGP<40% per le strategie di controllo esaminate nel clima di Roma,

Si ricorda che, a differenza della figura precedente, in questo grafico l'ottimo teorico si trova in alto a sinistra, punto in cui sia l'indice di prestazione energetica globale che il rischio di abbagliamento risultano nulli.

Osservando i risultati colpisce l'andamento della curva delle prestazioni dei vetri statici. Infatti è possibile notare come sia possibile ottenere per vetri selettivi con valori di trasparenza opposti (estremamente alti e bassi) prestazioni energetiche analoghe, ma valori significativamente diversi relativamente al rischio di abbagliamento (vetri più trasparenti sono associati ad un minor DGP<40%). Si può osservare come anche in questo caso l'utilizzo di una strategia di controllo per un componente dinamico permetta di "spostarsi" dalla curva che definisce il comportamento dei vetri statici muovendosi verso l'ottimo teorico.

Analizzando i risultati è possibile osservare che le strategie di controllo per le quali è stata ottenuta la prestazione migliore sia relativamente all'aspetto energetico che a quello di comfort visivo sono la ML_1_B_I e la U62/30_B_I. Le strategie ML_6_B_I e V72/38_B_I mostrano una analoga prestazione sia in termini energetici, per i quali essa risulta leggermente inferiore rispetto alle strategie ML_1_B_I e la U62/30_B_I, sia in termini di comfort visivo, per i quali è stato ottenuto un valore di DGP<40% equiparabile alle strategie più performanti. Le strategie mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento tramite il controllo del DGP sono caratterizzate appunto da un basso rischio di abbagliamento, a fronte però di un elevato valore di EP_{GL}. Le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici (LM_1, LM_6 e LM_7) mostrano un EP_{GL} maggiore rispetto alle strategie più performanti, a fronte anche di un maggior rischio di abbagliamento. Come detto, dall'analisi di questi ultimi risultati le strategie più efficaci sia in termini di comfort visivo che di prestazione energetica risultano essere ML_1_B_I e la U62/30_B_I. Tuttavia, l'analisi dei risultati relativi al solo comfort visivo mostrava come per la strategia ML_1_B_I il basso rischio di abbagliamento fosse collegato ad una altrettanto bassa disponibilità di luce naturale. Ciò non risulta invece vero per la U62/30_B_I, la quale mostra un'ottima prestazione sia in termini di DA che di DGP<40%, il che ne fa la strategia migliore in assoluto tra quelle investigate per il clima di Roma. Le considerazioni di cui sopra risultano perfettamente in linea con i risultati ottenuti per il clima di Torino.

4.7.3 Risultati simulazioni – Abu Dhabi

Per il clima di Abu Dhabi si è deciso di non investigare le strategie di controllo che prevedevano l'utilizzo di una veneziana interna (U62/30_B_I, V72_38_B_I, ML_1_B_I e ML_6_B_I), in quanto l'utilizzo di questo sistema di oscuramento mobile risulta sfavorevole per i climi in cui è predominante il fabbisogno di energia per il raffrescamento. Le veneziane sono quindi state posizionate esternamente, in modo da limitare gli apporti solari interni in presenza di radiazione solare intensa. Sono quindi state investigate, oltre alle strategie di controllo già presentate per i climi di Torino e Roma, le strategie di seguito descritte.

U62/30_B_E: Minimizzazione dell'abbagliamento. Una veneziana esterna con lamelle orientabili (0°, 15°, 30°) è utilizzata in coppia con il vetro selettivo ad alte prestazioni (U62/30), e cioè con $T_{vis} = 0.62$ e $g = 0.3$. Le lamelle sono ruotate all'inclinazione necessaria a mantenere il valore di DGP sotto la soglia del 40%.

V72/38_B_E: Minimizzazione dell'abbagliamento. Questa strategia è del tutto simile alla precedente, con l'unica differenza che viene accoppiato alla veneziana il vetro selettivo dalle prestazioni standard (V72/38), e cioè $T_{vis} = 0.72$ e $g = 0.38$.

4.7.3.1 Prestazione energetica

In figura 25 sono presentati gli indici di prestazione energetica per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione artificiale ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Abu Dhabi.

Dall'osservazione dei risultati è possibile innanzitutto notare che per il clima di Abu Dhabi l'indice di prestazione energetica per il raffrescamento risulta predominante nella definizione dell'indice di prestazione energetica globale, mentre l'indice di prestazione energetica per il riscaldamento risulta del tutto trascurabile.

Rispetto alle prestazioni dei componenti statici, e cioè i vetri selettivi o il componente elettrocromico tenuto fisso per tutto l'anno negli stati EC1 EC4, EC7 ed EC10, le strategie di controllo analizzate non si dimostrano efficaci nel ridurre il valore di EP_{GL} . Per le strategie di controllo mirate alla minimizzazione dei carichi termici (ML_1 e ML_6) sono stati ottenuti valori di EP_{GL} leggermente inferiori rispetto a quelli relativi al vetro selettivo ad alte prestazioni U62/30. Rispetto a quest'ultimo caso la strategia ML_1 mostra un valore di EP_C inferiore ed un valore di EP_L maggiore, mentre per la ML_6 è stato ottenuto un valore di EP_C maggiore di quello relativo alla precedente strategia (ma comunque inferiore a quello relativo al caso U62/30), mentre il valore di EP_L è trascurabile. La strategia di controllo ML_6 si dimostra, tra le due strategie di questa famiglia ed anche in senso assoluto per il clima di Abu Dhabi, la più efficace nel ridurre l'indice di prestazione energetica globale. Ciò dimostra che, anche nel clima di Abu Dhabi, la scelta di utilizzare come stadio di minima trasparenza del componente elettrocromico lo stato EC6 risulta vincente, in quanto quest'ultimo risulta in grado di minimizzare la somma del fabbisogno energetico per raffrescamento e per illuminazione. Le strategie mirate alla minimizzazione del rischio di abbagliamento (MG_L_1 e MG_L_1_i) mostrano valori di EP_{GL} più alti rispetto al caso U62/38, ma equiparabili, solamente per quanto riguarda la strategia MG_L_1_i, al caso del vetro statico selettivo dalle prestazioni standard (V72/38). L'utilizzo di veneziane esterne mobili accoppiate ai vetri selettivi non si dimostra efficace nel ridurre l'indice di prestazione energetica globale. Infatti la prestazione energetica dei componenti selettivi accoppiati ad una veneziana mobile risulta molto simile a quella degli stessi componenti senza la veneziana. Nel paragrafo successivo verrà invece verificata la loro efficacia dal punto di vista del comfort visivo all'utente.

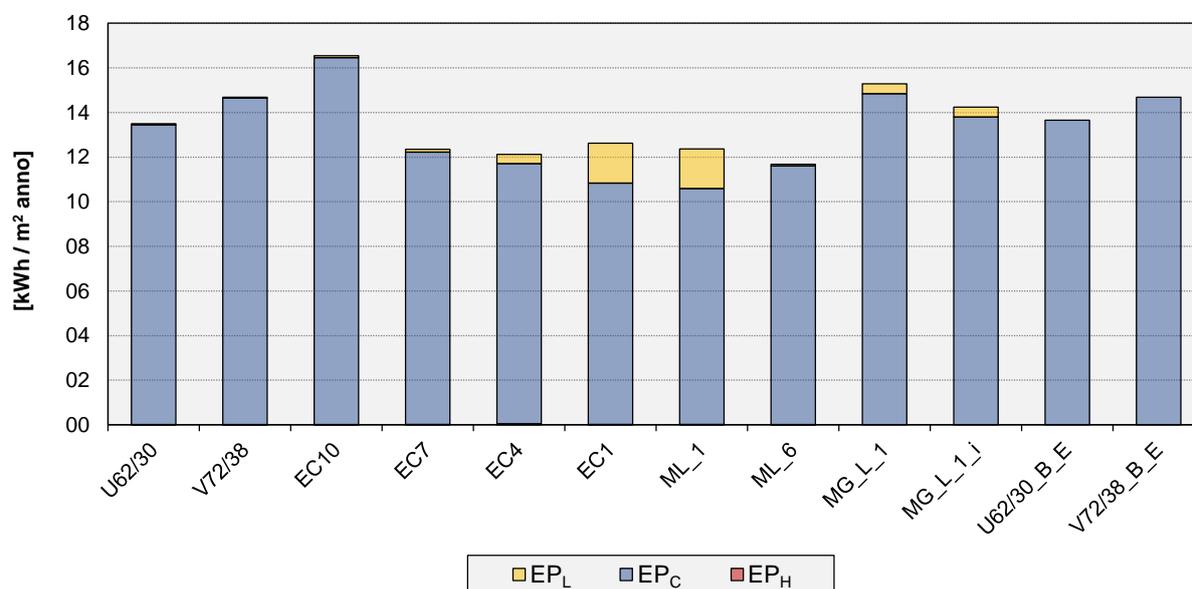


Figura 25. Indice di prestazione energetica per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Abu Dhabi.

L'analisi dei carichi di picco registrati durante l'anno per i vetri statici e le strategie di controllo investigate (tabella 8) concorda con le considerazioni fatte in precedenza per l'analisi degli indici di prestazione energetica.

I carichi di riscaldamento maggiori si registrano per i casi in cui il componente elettrocromico è tenuto fisso per tutto l'anno nei suoi stadi EC1 ed EC, oltre che per la strategia di controllo ML_1. mentre i valori più bassi sono relativi alle tecnologie statiche con maggiore trasparenza, e cioè il

vetro selettivo dalle prestazioni standard (V72/38) e il componente elettrocromico tenuto fisso per tutto l'anno nel suo stadio EC10. La variazione di questo parametro dal valore minimo a quello massimo registrati (74% circa) risulta significativa rispetto ai climi di Torino (3% circa) e Roma (15% circa). È però necessario sottolineare che per il clima di Abu Dhabi i carichi di picco per il riscaldamento sono molto bassi, per cui un significativo aumento percentuale risulta in un incremento in senso assoluto di poco maggiore rispetto a quello registrato per Roma. Per quanto riguarda i carichi di raffrescamento, i valori più alti risultano relativi al componente elettrocromico fisso nel suo stato EC10 per tutto l'anno ed alle strategie di controllo mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento tramite valutazione del DGP (MG_L_1 e MG_L_1_i), oltre che al componente selettivo dalle prestazioni standard accoppiato con una veneziana esterna (V72/38_B_I). I valori più bassi si registrano invece per le strategie di controllo mirate appunto alla minimizzazione dei carichi termici, e cioè ML_1, ML_6. I carichi di picco per l'illuminazione artificiale a differenza di quanto avviene per Torino e Roma, non risultano quasi mai uguali alla massima potenza dell'impianto. Ciò avviene perché, alla latitudine di Abu Dhabi, è presente luce naturale in tutti i momenti in cui l'ufficio cellulare considerato è occupato. I carichi di picco maggiori per l'illuminazione artificiale si registrano per il vetro selettivo a prestazioni standard, con o senza veneziana esterna (V72/38 e V72/38_B_E) e per il componente elettrocromico tenuto fisso per tutto l'anno nel suo stadio EC7. Il valore più alto risulta relativo alla strategia di controllo MG_L_1_i, mirata alla minimizzazione dell'abbagliamento tramite valutazione del DGP.

Anche per il clima di Abu Dhabi, come già osservato per gli altri due climi analizzati, il carico massimo sulla rete elettrica (Q_{C+L}) coincide con il carico massimo relativo al solo raffrescamento (Q_C) per molti dei casi analizzati con vetri tradizionali statici (selettivi o stadi del componente elettrocromico). Ciò risulta vero anche per le strategie di controllo mirate a minimizzare il rischio di abbagliamento, oltre che per i vetri statici selettivi accoppiati alla veneziana esterna. Q_{C+L} e Q_C risultano non contemporanei, e mostrano valori tra loro diversi, solamente per la strategia di controllo LM_1, la quale ha l'obiettivo di minimizzare i carichi termici. Ciò significa che essa è l'unica strategia di controllo, tra quelle investigate per il clima di Abu Dhabi, efficace nel ridurre il carico di picco sulla rete elettrica (Q_{C+L}), il quale infatti risulta inferiore al carico di picco registrato per il solo raffrescamento per diverse soluzioni statiche.

È interessante notare che alcune strategie di controllo che si sono dimostrate efficaci nel ridurre il carico di picco sulla rete elettrica per i climi di Torino e Roma (per esempio la strategia ML_6) risultano per il clima di Abu Dhabi del tutto inefficaci.

	Data e ora	Q_H [W _e /m ²]	Data e ora	Q_C [W _e /m ²]	Data e ora	Q_L [W _e /m ²]	Data e ora	Q_{C+L} [W _e /m ²]
U62/30	13/01 10:00	14.39	31/10 14:00	40.13	25/11 19:00	6.37	10/10 13:00	40.54
V72/38	13/01 10:00	7.38	31/10 14:00	45.62	08/11 19:00	6.23	31/10 14:00	45.62
EC10	13/01 10:00	9.33	31/10 14:00	49.46	18/11 19:00	6.58	10/31 14:00	49.46
EC7	13/01 10:00	23.29	10/08 13:00	38.11	13/11 19:00	6.16	05/08 13:00	38.79
EC4	13/01 10:00	29.07	26/08 13:00	37.42	23/11 19:00	6.86	26/08 13:00	38.82
EC1	13/01 10:00	28.26	26/08 13:00	37.36	02/11 19:00	6.93	26/08 11:00	41.86
ML_1	13/01 10:00	28.14	10/08 13:00	36.18	02/11 19:00	6.93	26/08 11:00	40.53
ML_6	13/01 10:00	22.15	10/08 13:00	37.27	18/11 19:00	6.58	10/08 13:00	37.27
MG_L_1	13/01 10:00	14.58	10/10 13:00	47.57	01/01 19:00	7.00	10/10 13:00	47.57
MG_L_1_i	13/01 10:00	15.33	10/10 13:00	46.75	02/11 19:00	6.93	09/10 13:00	46.76
U62/30_B_E	13/01 10:00	20.64	28/09 12:00	43.95	25/11 19:00	6.37	28/09 12:00	43.95
V72/38_B_E	13/01 10:00	19.35	31/10 14:00	46.96	08/11 19:00	6.23	31/10 14:00	46.96

Tabella 8. Carichi di picco per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Abu Dhabi.

4.7.3.2 Comfort visivo

In figura 26 sono presentati i risultati relativi agli indici di comfort visivo, e cioè Daylight Autonomy (DA) e Daylight Glare probability (DGP), ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Torino. Per quanto riguarda il DGP, indice che quantifica l'abbagliamento dovuto alla luce naturale, è stato valutato il rischio annuale di abbagliamento disturbante o intollerabile, corrispondente alla percentuale di ore occupate in cui il DGP è maggiore di 40%.

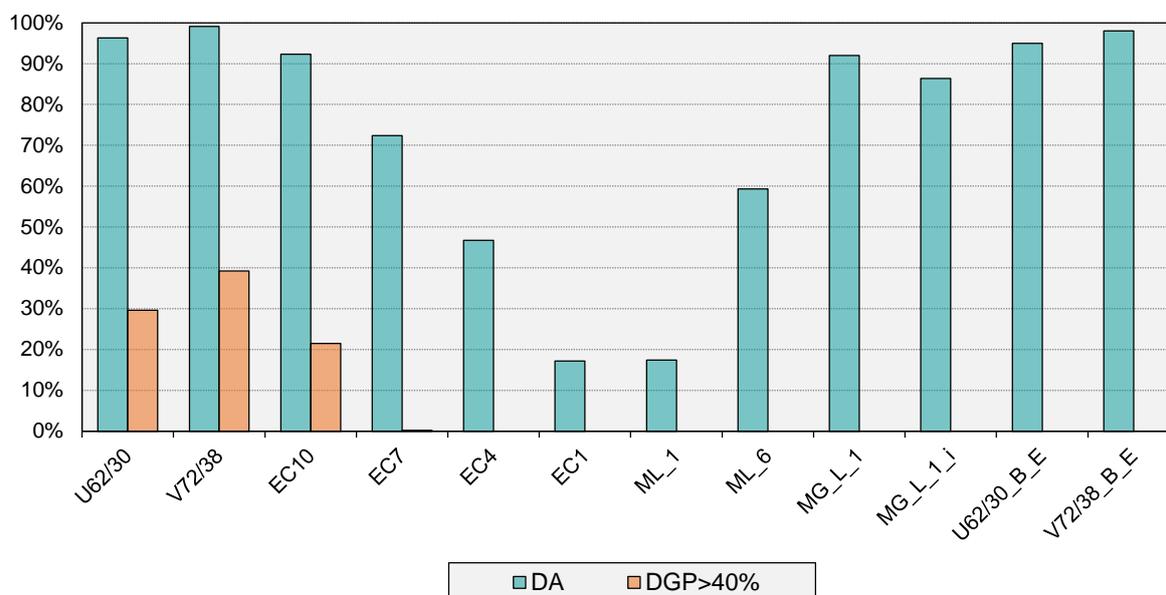


Figura 26. Daylight Autonomy (DA) e Daylight Glare probability (DGP) ottenuti per i vetri statici e le strategie di controllo investigate per il clima di Abu Dhabi.

Osservando i risultati relativi ai componenti statici analizzati è possibile notare la stessa tendenza già osservata per le località di Torino e Roma: ad una maggiore trasparenza del componente sono associati un più alto valore di DA ed un maggior rischio di abbagliamento disturbante o intollerabile. A differenza dei climi analizzati in precedenza, per Abu Dhabi il rischio di abbagliamento disturbante o molesto (DGP > 40%) risulta trascurabile per tutte le strategie di controllo analizzate. Ciò si spiega considerando che il percorso solare alla latitudine di Abu Dhabi è caratterizzato da un'alta elevazione solare anche durante il periodo invernale. Per questa ragione il fenomeno di abbagliamento diretto (disco solare all'interno del campo visivo dell'utente), preponderante alle latitudini di Torino e Roma, risulta ad Abu Dhabi praticamente nullo.

Considerando che tutte le strategie analizzate garantiscono un rischio di abbagliamento minimo, le strategie di controllo più performanti dal punto di vista del comfort visivo risultano quelle in grado di garantire i più alti valori di DA. Secondo questo criterio le strategie più efficaci nel garantire all'occupante un alto livello di comfort visivo risultano la U62/30_B_E e la V72/38_B_I, cioè le strategie relative ai vetri selettivi accoppiati con veneziana mobile esterna. Leggermente meno efficaci risultano le strategie mirate alla minimizzazione del rischio di abbagliamento (MG_L_1 e MG_L_1_i), per le quali sono stati ottenuti valori di DA di poco inferiori a quelli osservati per le strategie citate poc'anzi. Per le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici (ML_1 e ML_6) è stata invece osservata la prestazione peggiore, con valori di Daylight Autonomy di molto inferiori rispetto a quelli relativi ai componenti statici selettivi.

Nella figura 27 vengono correlati tra loro abbagliamento, espresso questa volta come percentuale del periodo di occupazione durante l'anno nella quale esso risulta impercettibile o al massimo percepibile (DGP < 40%) e la disponibilità di luce naturale, espressa nuovamente tramite la Daylight Autonomy.

Si ricorda che l'ottimo teorico di questo grafico è rappresentato dal punto in alto a destra, per il quale è massimizzata la penetrazione di luce naturale a fronte di un rischio di abbagliamento nullo. Osservando il grafico è possibile notare che la curva che definisce le prestazioni dei vetri statici risulta essere molto diversa rispetto a quella osservata per Torino e Roma. Infatti per vetri con trasparenza inferiore o uguale a quella di EC6 non è presente alcun rischio di abbagliamento. Per trasparenze superiori invece quest'ultimo aumenta, ma contestualmente aumenta anche la Daylight Autonomy.

Le considerazioni fatte in precedenza relativamente alla prestazione delle strategie di controllo analizzate risultano confermate. Infatti le strategie di controllo più vicine all'ottimo teorico sono quelle mirate alla minimizzazione del rischio di abbagliamento per un vetro selettivo tramite l'utilizzo di una veneziana mobile (U62/30_B_E e V72/38_B_E). Le strategie mirate alla minimizzazione del rischio di abbagliamento tramite il controllo del DGP mostrano valori simili alle strategie precedenti in termini di $DGP < 40\%$, ma valori inferiori in termini di DA.

Le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici (ML_1, ML_6) mostrano una prestazione, in termini di comfort visivo, equiparabile a quella definita dalla curva di prestazione dei vetri statici. Infatti utilizzando un vetro statico con trasparenza pari agli stadi del componente elettrocromico EC1 ed EC6 si otterrebbero gli stessi risultati, relativamente al comfort visivo, osservati per il componente elettrocromico controllato rispettivamente attraverso le strategie ML_1 e ML_6.

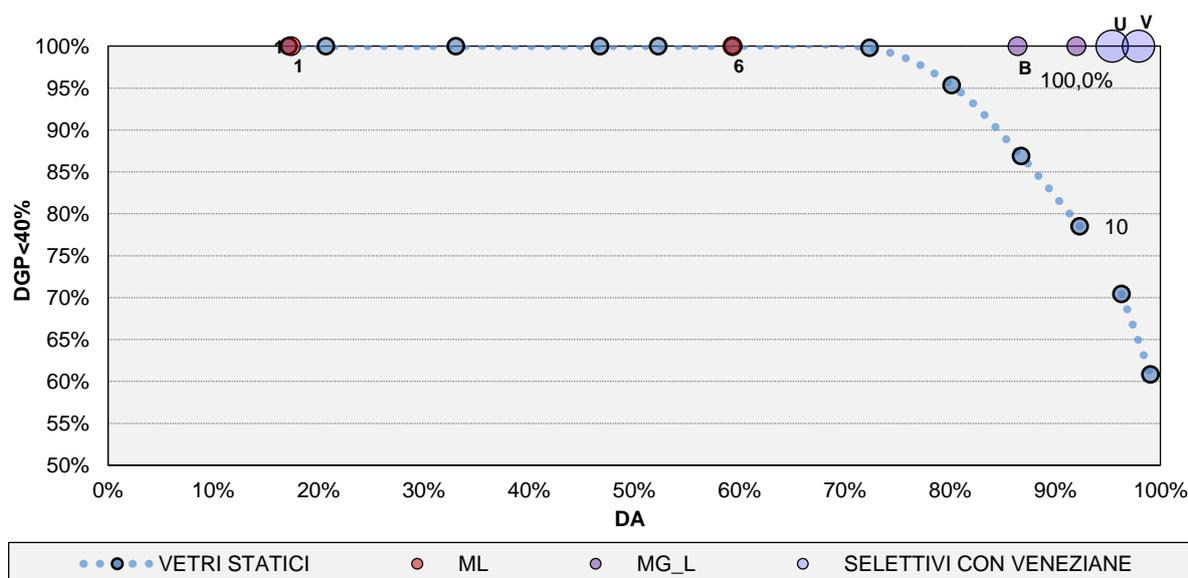


Figura 27. Correlazione di DA e $DGP < 40\%$ per le strategie di controllo esaminate nel clima di Abu Dhabi.

4.7.3.3 Correlazione tra prestazione energetica e comfort visivo

Nella figura 28 vengono correlati tra loro l'abbagliamento, espresso come percentuale del periodo di occupazione durante l'anno nella quale esso risulta impercettibile o al massimo percepibile ($DGP < 40\%$) e l'indice di prestazione energetica globale (EP_{GL}).

Si ricorda che, a differenza della figura precedente, in questo grafico l'ottimo teorico si trova in alto a sinistra, punto in cui sia l'indice di prestazione energetica globale che il rischio di abbagliamento risultano nulli.

Osservando i risultati colpisce l'andamento della curva delle prestazioni dei vetri statici, opposto rispetto a quella osservata per Torino e Roma. Vetri con trasparenza inferiore o uguale a quella del componente elettrocromico nel suo stadio EC7 mostrano valori di EP_{GL} simili tra loro, a fronte di un rischio di abbagliamento nullo. All'aumentare della trasparenza del vetro la prestazione si allontana

dall'ottimo teorico, in quanto crescono sia l'indice di prestazione energetica globale, sia il rischio di abbagliamento disturbante o molesto.

Si può osservare come per questo clima l'utilizzo di una strategia di controllo per un componente dinamico permetta "spostarsi" dalla curva che definisce il comportamento dei vetri statici muovendosi sia verso l'ottimo teorico, ma anche allontanandosi da esso. Le strategie di controllo mirate alla minimizzazione dell'abbagliamento, sia nel caso del componente elettrocromico (MG_L_1 e MG_L_1_i) sia in quello di vetri selettivi accoppiati con veneziane (U62/30_B_E e V72/38_B_E), mostrano valori di DGP<40% più alti rispetto alla curva di prestazione dei vetri statici, ma il loro indice di prestazione energetica risulta più alto di quello che si potrebbe ottenere utilizzando un vetro statico con trasparenza uguale o maggiore a quella del componente elettrocromico nel suo stadio EC8. Le strategie mirate alla minimizzazione dei carichi termici si trovano invece sulla curva delle prestazioni dei vetri statici, il che significa che è possibile ottenere le stesse prestazioni, sia in termini energetici sia in termini di comfort visivo, utilizzando un vetro tradizionale statico. La strategia di controllo che più si avvicina all'ottimo teorico è rappresentata dalla ML_6, per la quale sono stati ottenuti risultati, relativamente sia all'aspetto energetico sia al comfort visivo, equiparabili a quelli ottenuti per il componente elettrocromico mantenuto per tutto l'anno nel suo stadio EC4.

È quindi possibile concludere che, rispetto alla prestazione di un vetro statico tradizionale, le strategie di controllo investigate per il clima di Abu Dhabi non sono in grado di garantire un significativo miglioramento né rispetto alla prestazione energetica né relativamente al comfort visivo.

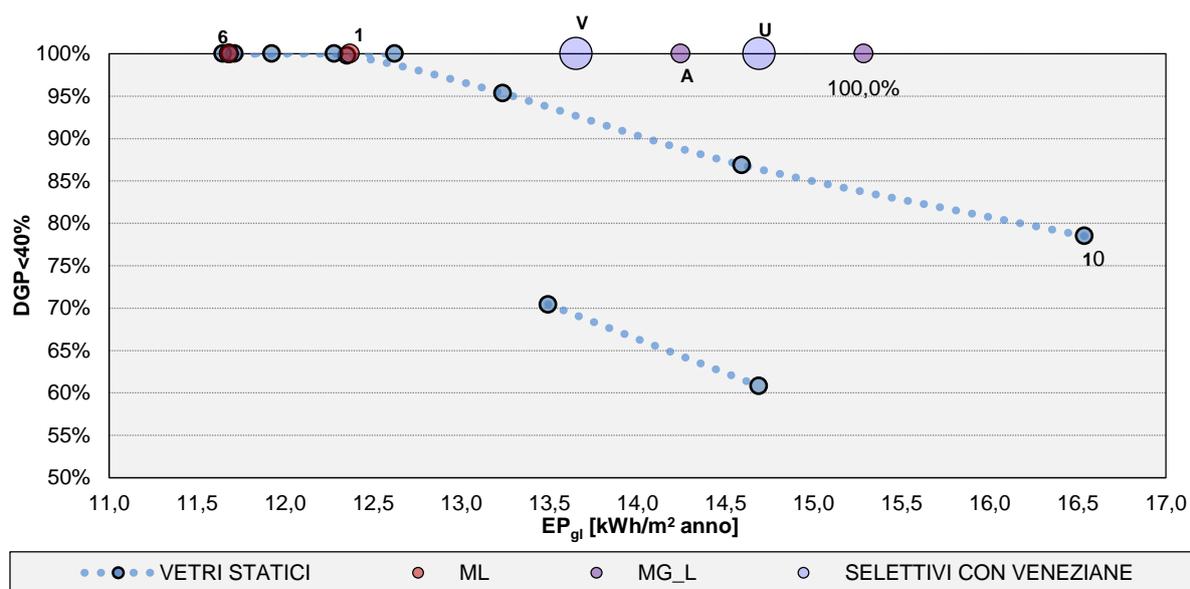


Figura 28. Correlazione di EP_{GL} e DGP<40% per le strategie di controllo esaminate nel clima di Abu Dhabi.

4.8 Discussione

L'efficacia di una tecnologia trasparente dinamica controllata attivamente dipende strettamente dalle condizioni al contorno, quali la posizione, il clima, l'orientamento, dalla variazione delle sue proprietà fisiche e della strategia di controllo utilizzata. In particolare, si evince dai risultati ottenuti che non esiste un controllo ottimale in assoluto, ma invece un controllo ottimo in base alle prestazioni che si vogliono massimizzare.

Dai risultati presentati, si evince chiaramente come il vantaggio di poter controllare dinamicamente un componente trasparente, rispetto ad un componente statico, sia la possibilità di ottimizzare le prestazioni relative più requisiti cercando dinamicamente soluzioni di trade-off compatibili con le

forzanti in esame (i.e. riduzione fabbisogno energetico e riduzione dell'abbagliamento e/o massimizzazione della luce naturale e riduzione dell'abbagliamento). Al contrario, una strategia che tiene conto di più parametri di prestazione allo stesso tempo per mezzo di un vetro statico risulta limitata, ed è quindi necessario in fase di progettazione mediare tra requisiti prestazionali diversi e talvolta opposti (i.e. la massimizzazione degli apporti solari gratuiti contrasta con il surriscaldamento o il fabbisogno di raffrescamento estivo). Questo risultato è chiaramente visibile nelle figure 29 e 30, in cui vengono confrontati i dati prestazionali relativi a diverse strategie di controllo e relativi a vetri statici rispetto a obiettivi multipli, allo stesso tempo, per i diversi casi studio analizzati. In particolare la figura 29 confronta la prestazione relativa alla Daylight Autonomy con la prestazione relativa alla percentuale di tempo in cui è presente un abbagliamento inferiore ad una certa soglia ($DGP < 0.4$); l'ottimo prestazionale è rappresentato dalla parte in alto a destra del grafico ($DA=100\%$ e $DGP < 0.4=100\%$). Analogamente la figura 30 confronta il fabbisogno energetico con l'abbagliamento e l'ottimo prestazionale è rappresentato dalla parte in alto a sinistra del grafico (EP_{gl} minimo e $DGP < 0.4=100\%$).

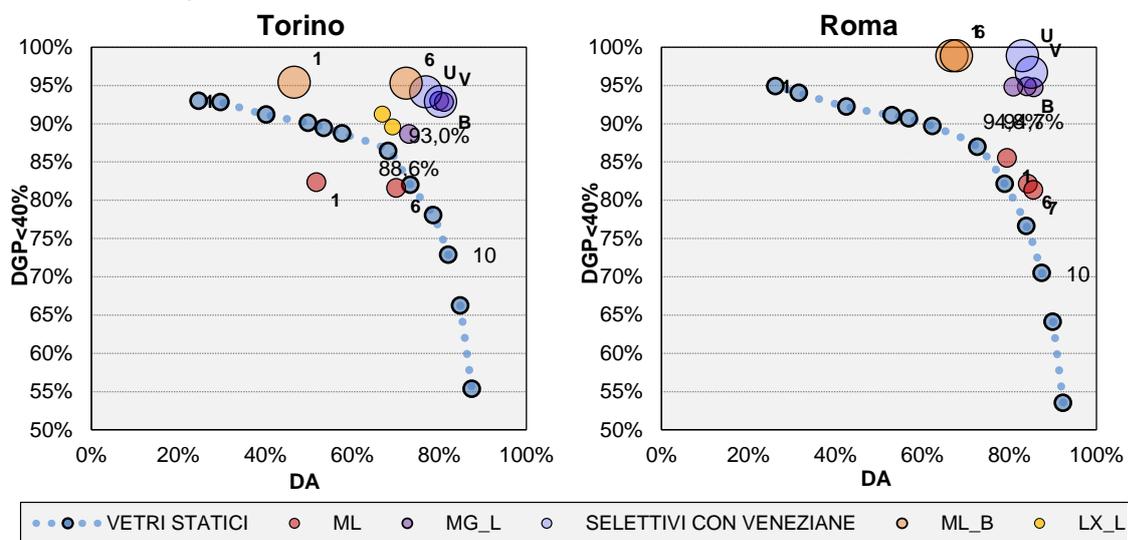


Figura 29. Correlazione di DA e $DGP < 40\%$ per le strategie di controllo esaminate nei climi di Torino e Roma.

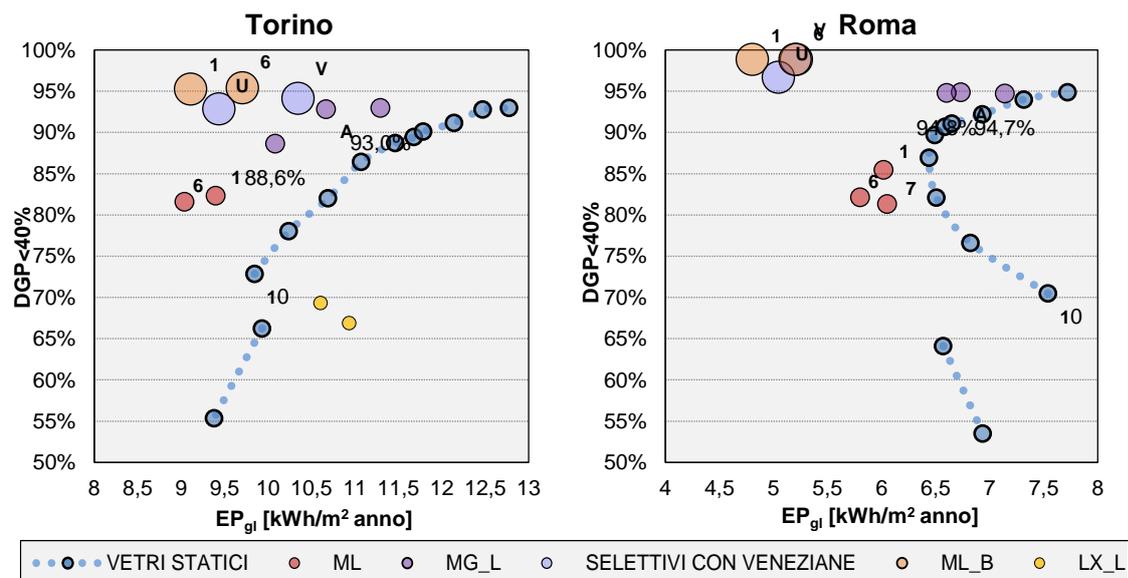


Figura 30. Correlazione di EP_{gl} e $DGP < 40\%$ per le strategie di controllo esaminate nei climi di Torino e Roma.

Da questi grafici è visibile il limite di prestazione relativo ai vetri statici (corrispondenti ai diversi stati in cui è controllabile il vetro elettrocromico), a confronto con vetri con gli stessi stati estremi, ma controllati attivamente.

Inoltre da questo modo di rappresentare i risultati emerge come:

- a) non esista una strategia di controllo ottimale per tutti i casi di studio e di come invece dipenda da caratteristiche di progetto e dalla prestazione che si vuole ottimizzare;
- b) l'integrazione di una tecnologia dinamica controllata attivamente non implichi necessariamente un miglioramento delle prestazioni dell'edificio (c.f. figura 30, Torino), poichè l'utilizzo di strategie di controllo non ottimizzate per le condizioni locali potrebbero inficiare il raggiungimento di prestazioni superiori ad una tecnologia vetrata statica.

Il confronto di contesti climatici differenti (i.e. Torino, con fabbisogni e carichi di riscaldamento preponderanti rispetto a quelli di raffrescamento, e Roma, con fabbisogni a carichi di riscaldamento e raffrescamento confrontabili), ha permesso di evidenziare che per tecnologie trasparenti dinamiche, anche se controllate attivamente, risulta estremamente difficile gestire i requisiti energetici (fabbisogno di energia per riscaldamento, raffrescamento e illuminazione) con quelli di riduzione dell'abbagliamento, per climi / ambienti con alto fabbisogno di riscaldamento (i.e. Torino) poichè risultano molto contrastati. Ciò è dovuto alla necessità di mediare tra la contemporaneità di apporti gratuiti invernali e maggior rischio di abbagliamento. Mentre in climi / ambienti con fabbisogni per lo più legati al raffrescamento, i requisiti prestazionali energetici risultano in linea con requisiti prestazionali di comfort luminoso (DA e DGP). In generale, come da figura 29, attraverso l'ottimizzazione di strategie di controllo, requisiti prestazionali relativi alla luce naturale (DA) risultano essere conciliabili con requisiti di riduzione del rischio da abbagliamento.

Un livello ulteriore di analisi riguarda, non la prestazione energetica annuale, ma la capacità della strategia di controllo e delle tecnologie dinamiche trasparenti di ridurre la potenza termica di picco richiesta all'impianto, il carico di picco e il profilo orario elettrico richiesto dalla rete. Analogamente per le prestazioni globali annuali, la scelta delle strategie di controllo influenza significativamente fabbisogni di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione. In particolare, per climi in cui un tipo di fabbisogno è preponderante su altri il controllo che individua il miglior compromesso tra il fabbisogno di energia ed il rischio di abbagliamento (MG_L) può comportare un aumento dei carichi termici di riscaldamento e raffrescamento ed elettrici, rispetto ai carichi massimi osservati con componenti statici di involucro. Invece, strategie di controllo che ottimizzano il fabbisogno energetico, senza considerare il comfort visivo, comportano carichi mediamente più bassi.

Considerando i profili giornalieri, figura 31 (a, b and c), si evince come l'effetto di alcune strategie di controllo sia non solo la riduzione dei carichi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, ma anche una variazione temporale del picco di carico sulla rete elettrica. Nel caso particolare la variazione temporale del carico elettrico di picco è di un'ora (c.f. figura 31) rispetto al carico elettrico di picco sullo stesso ambiente con un vetro statico. Aldilà del risultato numerico specifico, questo lascia intuire la possibilità di utilizzare con una certa flessibilità il controllo attivo di vetri dinamici anche per rispondere a logiche di gestione della domanda di energia (demand management) al fine di aumentare la flessibilità dell'edificio rispetto alla rete elettrica.

In conclusione l'attività numerica ha evidenziato come la prestazione energetica e ambientale dell'edificio dipenda fortemente dalle strategie di controllo messe in atto per controllare attivamente una tecnologia trasparente dinamica. Queste possono permettere di individuare nel tempo soluzioni di compromesso tra le funzioni da ottimizzare. E' importante comunque sottolineare che se non progettate ed integrate correttamente potrebbero comportare anche una riduzione delle prestazioni dell'edificio, rispetto a tecnologie vetrate tradizionali. Per questo motivo il supporto modellistico e numerico alla progettazione e all'ottimizzazione del controllo, rispetto ai parametri di progetto ed ai requisiti prestazionali, risulta fondamentale.

Alla luce di quanto scritto, risultano evidenti i vantaggi conseguenti all'uso di modelli numerici avanzati e all'ottimizzazione del controllo durante l'esercizio del componente. I risultati ottenuti in

questo studio supportano pertanto l'opportunità di valutare gli effetti di strategie di controllo più avanzate che siano di natura predittiva e basate sull'utilizzo di modelli. È evidente che le strategie di controllo su componenti trasparenti dinamici attivi devono tenere conto di obiettivi spesso contrastanti che richiedono l'utilizzo di processi basati su ottimizzazione numerica e modelli predittivi. A questo riguardo risulta ad oggi molto limitato l'applicazione di controlli "Model based" per tecnologie dinamiche trasparenti di involucro edilizio, ed in generale per tecnologie dinamiche di involucro.

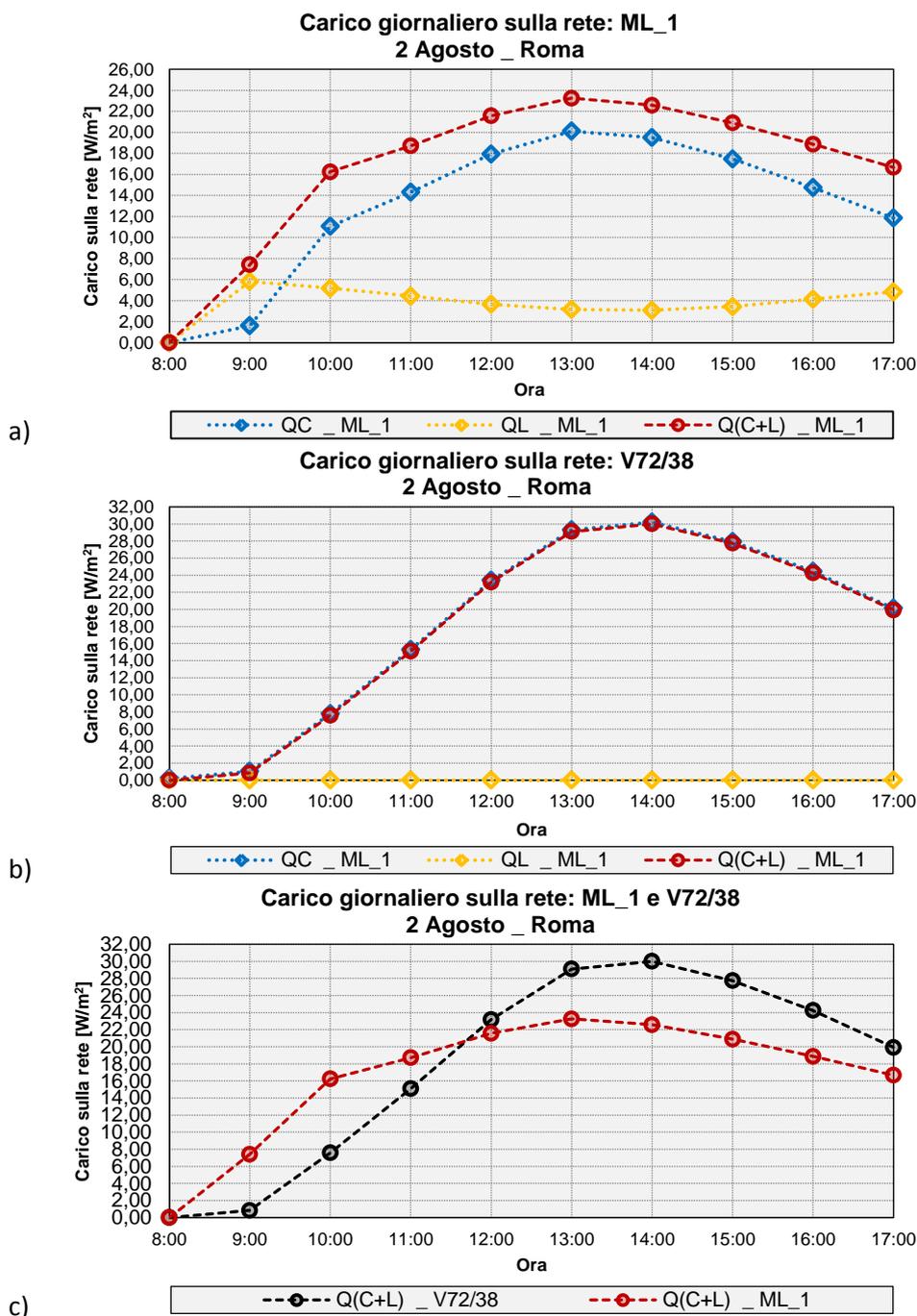


Figura 31. Carico giornaliero sulla rete elettrica al 2 Agosto nel clima di Roma per la strategia di controllo a) ML_1, b) il vetro selettivo dalle prestazioni standard (V72/30) e c) confronto tra i carichi totali relativi a questi due casi.

5 Conclusioni

L'attività di ricerca svolta per il progetto PAR 2017, durante il periodo 2017-2018, dal titolo "Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo" presso il Politecnico di Torino ha avuto lo scopo di valutare l'influenza delle strategie di controllo di tecnologie trasparenti dinamiche attive sulle prestazioni degli edifici. In particolare è stata analizzata l'influenza del controllo sulla prestazione energetica e il comfort visivo. Inoltre alcune analisi hanno riguardato l'opportunità di stimare la variazione dei profili di carico termico ed elettrico (potenza) relativi agli usi di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione. L'attività si è svolta in due fasi:

- a) Caratterizzazione sperimentale di un componente vetrato dinamico attivabile, nello specifico un vetro elettrocromico, integrato in una test cell esposta a condizioni climatiche reali e simulante un ambiente tipo per valutarne le prestazioni in condizioni reali di esercizio. Ciò ha permesso di valutare i parametri prestazionali di riferimento nei diversi stati di colorazione; quantificare l'influenza della variazione delle proprietà ottiche e termofisiche del componente vetrato sui carichi energetici dell'ambiente; di calibrare il modello numerico utilizzato nella fase successiva.
- b) Analisi numerica degli effetti di numerose strategie di controllo e sulle prestazioni energetiche e di comfort visivo nonché sui carichi di picco del sistema edificio – impianto. In particolare è stato valutata l'efficacia di diverse strategie di controllo di cui alcune documentate in letteratura, (Rule Based Control, RBC) nell'ottimizzare le condizioni di comfort visivo interno, fabbisogno energetico e carichi di picco.

I risultati generali dell'attività di ricerca del PAR 2017 sono i seguenti:

- a) Il vantaggio dell'integrazione di componenti dinamici vetrati di involucro controllati attivamente risiede nella capacità delle logiche di controllo individuare dinamicamente condizioni di trade-off relative a molteplici obiettivi prestazionali (i.e. riduzione dei fabbisogni energetici, miglioramento del comfort visivo interno e riduzione dei carichi di picco dell'impianto e conseguentemente della rete elettrica);
- b) La variabilità di queste prestazioni ed il raggiungimento delle prestazioni attese sono strettamente legate alle strategie di controllo utilizzate. In altre parole la messa in campo di strategie di controllo non ottimizzate, potrebbe pregiudicare il raggiungimento delle prestazioni attese che potrebbero essere peggiori rispetto a quelle ottenibili con vetrate tradizionali, i.e. vetri camera con rivestimenti selettivi;
- c) Per assicurare la corretta integrazione edilizia di tecnologie dinamiche trasparenti, risulta necessaria una corretta progettazione delle strategie di controllo. Ciò deve essere perseguito attraverso: :
 - il corretto utilizzo e l'integrazione nel processo progettuale di strumenti di simulazione avanzata (come quelli sviluppati nell'ambito del PAR);
 - la progettazione e l'utilizzo di modelli numerici affidabili ed efficaci (in termini di accuratezza, velocità di calcolo e costo di implementazione) che supportino il controllo in tempo reale di elementi trasparenti di involucro.

L'attività di ricerca futura sull'integrazione di elementi dinamici di involucro trasparenti si concentrerà proprio nella creazione e validazione di modelli numerici che possano supportare un controllo in tempo reale di componenti dinamici di involucro, e la loro implementazione in campo.

6 Riferimenti bibliografici

1. C.G. Granqvist. "Transparent conductors as solar energy materials: a panoramic review", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91 (2007), pp. 1529–1598, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.031>.
2. C.G. Granqvist. "Electrochromics and thermochromics: towards a new paradigm for energy efficient buildings", *Atti di: 5th International Conference on functional materials and devices (ICFMD 2015)*, 4- 6 Agosto 2015, Johor Bahru, Malaysia, *Materials Today: Proceedings*, 2016, S2-S11.
3. P. Nitz, H. Hartwig. "Solar control with thermotropic layers", *Solar Energy*, 79 (2005), pp. 573–582, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.12.009>.
4. O. Mueling, A. Seeboth, T. Haeusler, R. Ruhmann, E. Potechius, R. Vetter. "Variable solar control using thermotropic core/shell particles", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93 (2009), pp. 1510–1517, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.03.029>.
5. A. Cannavale, G.E. Eperon, P. Cossari, A. Abate, H.J. Snaith, G. Gigli. "Perovskite photovoltaic cells for building integration", *Energy & Environmental Science*, 8:5 (2015), pp. 1578–1584, <https://doi.org/10.1039/C5EE00896D>.
6. M. Zinzi, G. Rossi, P. Iacomussi, V. Serra, L. Giovannini. "Analisi numerica e sperimentale di vetri termocromici per applicazioni in edifici ad uso ufficio", *Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2016*.
7. L. Giovannini, V. Serra, V.R.M. Lo Verso, A. Pellegrino, M. Zinzi, F. Favoino. "A novel methodology to optimize visual comfort and energy performance for transparent adaptive façades", *Atti di: 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering (IEEE EEEIC)*, 12–15 Giugno 2018, Palermo, Italy, IEEE Xplore digital library.
8. L. Giovannini, F. Favoino, V. Serra, M. Zinzi. "Thermo-chromic glazing in buildings: a novel methodological framework for a multi-objective performance evaluation", *Atti di: ICAE2018: The 10th International Conference on Applied Energy*, 22-25 agosto 2018, Hong Kong, China.
9. R. Baetens, B. P. Jelle, A. Gustavsen. "Properties, requirements and possibilities of smart windows for daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94 (2010), pp. 87–105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>.
10. W. Feng, L. Zou, G. Gao, G. Wu, J. Shen, W. Li. "Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis", *Solar Energy Material and Solar Cells*, 144 (2016), pp. 316–323, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.029>.
11. D.J. Gardiner, S.M. Morris, H.J. Coles. "High-efficiency multi stable switchable glazing using smectic A liquid crystals", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93:3 (2009), pp. 301–306, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.023>.
12. F. Favoino, M. Overend, Q. Jin. "The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies", *Applied Energy*, 156 (2015), pp. 1-15, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.065>.
13. F. Favoino. "Simulation-based Evaluation of Adaptive Materials for Improved Building Performance", in: F. Pacheco Torgal, C. Buratti, S. Kalaiselvam, C.G. Granqvist, V. Ivanov. *Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency*, VIII (2016) pp. 1-484, Springer International Publishing, Basilea, Svizzera.
14. F. Favoino, F. Fiorito, A. Cannavale, G. Ranzi, M. Overend. "Optimal control and performance of photovoltaic switchable glazing for building integration in temperate climates", *Applied Energy*, 178 (2016), pp. 943–961, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.107>.
15. F. Guglielmetti, F. Bisegna. "Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate", *Building and Environment*, 38 (2003), pp. 479–492, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00124-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00124-5).

16. E.S. Lee, E.S. Claybaugh, M. LaFrance. "End user impacts of automated electrochromic windows in a pilot retrofit application", *Energy and Buildings*, 47 (2012), pp. 267–284, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.003>. ISSN 0378-7788.
17. M. Zinzi. "Office worker preferences of electrochromic windows: a pilot study", *Building and Environment*, 41:9 (2006), pp. 1262–1273, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.010>. ISSN 0360-1323.
18. M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino. "Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies", *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 2829–2834, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.004>.
19. P.F. Tavares, A.R. Gaspar, A.G. Martins, F. Frontini. "Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates", *Energy Policy*, 67 (2014), pp. 68–81, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.038>.
20. P. Tavares, H. Bernardo, A. Gaspar, A. Martins. "Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in mediterranean buildings refurbishment", *Solar Energy*, 134 (2016), pp. 236–250, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.022>.
21. R.C.G.M. Loonen, J.L.M. Hensen. "Smart windows with dynamic spectral selectivity – a scoping study", *Atti di: Building Simulation 2015: 14th International Conference of IBPSA*, 7-9 dicembre 2015, Hyderabad, India, IBPSA, 2015, pp. 2158-2165.
22. J.M. Dussault, L. Gosselin, T. Galstian. "Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads", *Solar Energy*, 86:11 (2012), pp. 3405–3416, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.016>. ISSN 0038-092X.
23. R.C.G.M. Loonen, F. Favoino, J.L.M. Hensen, M. Overend. "Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades", *Journal of Building Performance Simulation*, 10:2 (2017), pp. 205–223, <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>.
24. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300 - 5, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell' energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili, marzo 2016.
25. Repubblica Italiana, Decreto Ministeriale 5 luglio 1975 "Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico sanitari principali dei locali d'abitazione", pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 190 del 18 luglio 1975.
26. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN 12464-1, Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni, luglio 2011.
27. C. F. Reinhart, J. Mardaljevic, Z. Rogers. "Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design", *Leukos*, 3:1 (2006), pp. 7-31, <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>.
28. J. Wienold, J. Christoffersen. "Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras", *Energy and Buildings*, 38:7 (2006), p. 743-757, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.017>.
29. J. Wienold. "Dynamic daylight glare evaluation", *Atti di: 11th International IBPSA (International Building Performance Simulation Association) Conference – Building Simulation*, 27-30 luglio 2009, Glasgow, Scotland, 2009, pp. 944-951.
30. R.G. Hopkinson. "Discomfort in lighted streets", *Lighting Research & Technology*, 5 (1940), pp. 1–32, <https://doi.org/10.1177/147715354000500101>.
31. <https://www.iea.org/Sankey/#?c=United%20Arab%20Emirates&s=Balance>
32. <https://daysim.ning.com/>
33. <https://energyplus.net/>
34. <https://www.grasshopper3d.com/>
35. <https://www.rhino3d.com/it/>
36. <https://www.ladybug.tools/>
37. <https://windows.lbl.gov/software/window>

Appendice A – Analisi di letteratura delle strategie di controllo e schede di sintesi

[1] 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 con diversi coating, 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 vengono presi in considerazione né l'utilizzo di oscuramenti per evitare l'abbagliamento né il conseguente aumento del fabbisogno energetico dovuto all'impianto di illuminazione artificiale.

La strategia di controllo che porta ai migliori risultati risulta quella basata sull'illuminamento. Mediante l'utilizzo di tale strategia, le differenze tra il fabbisogno di energia elettrica dovuta all'illuminazione artificiale relativa ad elettrocromici con diverse proprietà ottiche risulta minima. Meno efficaci risultano le strategie basate sull'irradianza verticale esterna. Vengono esaminate diverse soluzioni con differenti valori limite di irradianza: in particolare, più è alto il *Window-to-Wall Ratio* (WWR, rapporto tra area di facciata trasparente ed opaca), minore risulta il valore di irradianza solare verticale esterna a cui si dovrebbe raggiungere lo stato più scuro dell'elettrocromico. La taglia del componente trasparente influenza notevolmente il peso del fabbisogno di illuminazione sui consumi finali: un $WWR < 0.35$ renderà tale fattore il più influente sul fabbisogno energetico globale. Né risulta quindi che, per bassi WWR (< 0.35), le strategie di controllo che mirate alla massimizzazione dell'illuminamento orizzontale interno risultano le più efficaci dal punto di vista energetico. Allo stesso modo la strategia basata sul carico di raffreddamento, penalizzando i fabbisogni elettrici per illuminazione, può risultare efficace solo in edifici dove non sia necessario mantenere un illuminamento minimo orizzontale o per WWR molto alti.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
1994	R. Sullivan, E.S. Lee, K. Papamichael, M. Rubin, S. Selkowitz	Lawrence Berkeley Laboratory	Simulazione	Energetico
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO		OBIETTIVO: Lighting energy use/ daylight		
	ON (scuro) "default"			OFF (chiaro) E < 583 lx
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA		OBIETTIVO: Total energy use		
	START	<i>Funzione lineare di controllo</i>		END
	63 W/m ²			189 W/m ²
	63 W/m ²			315 W/m ²
	63 W/m ²			630 W/m ²
CARICO DI RAFFREDDAMENTO		OBIETTIVO: Cooling energy use / overheating		
	ON (scuro) presenza			OFF (chiaro) assenza
INDICATORI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di illuminazione, riscaldamento, raffrescamento e fabbisogno di energia totale			
BENCHMARKS				
Vetro colorato in pasta GRIGIO, SC 0.54 T_{vis} 0.38		LOW-E		CHIARO RIFLETTENTE

[2] **Control strategies and energy saving potentials for variable transmittance windows versus static windows**

Karlsson et al. comparano la prestazione di diversi tipi di vetri statici altamente performanti a quattro diversi tipi di Smart Windows, confrontando i fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento relativi ad ogni tecnologia considerata. Le simulazioni numeriche sono state effettuate per diversi orientamenti e differenti condizioni climatiche (Miami, Denver, Stoccolma). Sono state testate due strategie di controllo basate sulla radiazione solare verticale esterna, con switch lineare per due diversi valori limite per gli stati di massima trasparenza e colorazione dei componenti trasparenti dinamici.

I risultati ottenuti per le Smart Windows esistenti sono simili a quelli relativi ai componenti statici valutati, ma implicano un risparmio energetico sul fabbisogno di illuminamento, anche se questo aspetto è indagato marginalmente nello studio. Al contrario, le Smart Windows *ideali* simulate mostrano una prestazione energetica migliore rispetto ai vetri statici considerati, per tutti gli orientamenti tranne quello Nord. Dal punto di vista energetico l'applicazione delle Smart Windows risulta essere più efficace nei climi caldi che in quelli freddi. La strategia A con valori limite più bassi è adatta a climi più freddi; la strategia B, con valori di soglia più alti, risulta più adatta ai climi caldi.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2000	J. Karlsson, B. Karlsson, A. Roos	Uppsala University	Simulazione	Energetico
OBIETTIVO: Total energy use				
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	START	<i>Funzione lineare di controllo</i>		END
	50 W/m ²			300 W/m ²
	200 W/m ²			400 W/m ²
INDICATORI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Risparmio energetico sul riscaldamento e raffrescamento			
Comfort visivo	Comparazione delle trasmittanze luminose			
BENCHMARKS				
CHIARO	LOW-e	CONTROLLO SOLARE	SMART WINDOWS (reali e ideali)	

[3] **Control system and energy saving potential for switchable windows**

Lo studio di Karlsson si concentra sulla comparazione delle potenzialità di risparmio energetico di vetri dinamici rispetto ai vetri statici più performanti, in modo da valutare l'efficacia di tali tecnologie. Vengono esaminate le prestazioni di vetri dinamici per diversi luoghi e in diversi orientamenti, con un controllo basato sulla radiazione solare incidente e un controllo "intelligente", che associa al controllo dello stato di colorazione dei componenti dinamici un algoritmo che considera la temperatura ambientale interna e la presenza di occupanti all'interno dell'ambiente. Viene suggerita, come futura direzione di sviluppo, di basare il controllo di vetri dinamici sull'illuminamento interno.

I risultati dello studio mostrano come l'utilizzo del sistema di controllo più avanzato migliori sensibilmente le prestazioni sia dei vetri statici (in questo caso il miglioramento è dato dall'ottimizzazione dell'accensione dell'impianto di ventilazione, del sistema di recupero del calore, e dell'impianto di illuminazione artificiale), sia dei componenti dinamici. Inoltre, l'impegno di vetri dinamici si dimostra più efficace nell'ottimizzazione della prestazione energetica rispetto all'utilizzo di componenti vetrati statici: consente infatti, a seconda del clima, risparmi energetici fino a 150 kWh/m²anno.

Dai risultati di questo studio è possibile dedurre che le prestazioni di un vetro elettrocromico siano fortemente dipendenti dalle caratteristiche climatiche, dal tipo di edificio, dall'orientamento ed anche dai requisiti minimi di comfort richiesti.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2001	J. Karlsson	Uppsala University	Simulazione	Energetico
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	OBIETTIVO: Total energy use			
	START 50 W/m ²	<i>Funzione lineare di controllo</i>		END 300 W/m ²
SISTEMA INTELLIGENTE (albero decisionale if-then)	OBIETTIVO: Total energy use/ thermal comfort			
	START 50 W/m ²	<i>Funzione lineare di controllo</i>		END 300 W/m ²
	OCCUPANCY	Tmax	Tmin	SWITCH
	sì	25°C	20°C	sì
	no	27°C	18°C	no
Quando l'albero decisionale porta allo switch esso seguirà la funzione lineare 50-300 W/m ²				
INDICATORI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Risparmio energetico sul riscaldamento e raffrescamento			
BENCHMARKS				
CHIARO	LOW-e	CONTROLLO SOLARE	SMART WINDOWS	(reali e ideali)

[4] 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 ed affianca allo studio di una strategia di controllo per vetro elettrocromico l'analisi delle prestazioni dell'impianto di illuminazione. L'approccio utilizzato in questo lavoro è infatti dichiaratamente orientato ad ottimizzare, prima che la prestazione energetica, la disponibilità di luce naturale in ambiente, e di conseguenza le condizioni di comfort visivo per l'occupante.

Vengono esaminate tre diverse città (Roma, Bolzano, Catania), con climi tra loro differenti, e due tipi di sistemi vetrati elettrocromici (faccia 2 del vetrocamera con e senza rivestimento basso-emissivo). Sono analizzati i fabbisogni energetici per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione artificiale. Quest'ultimo è suddiviso in tre gruppi di controllo all'interno dell'ambiente in esame, per ciascuno dei quali l'accensione e spegnimento sono regolati da un fotosensore. Ogni gruppo di controllo è dimmerabile, cioè in grado di funzionare ad una potenza tale da integrare l'eventuale presenza di luce naturale per raggiungere il requisito minimo di illuminamento sul piano di lavoro. Tale requisito minimo è stato posto pari a 100 lx, 300 lx e 500 lx. I componenti elettrocromici in esame sono controllati sia per mezzo di una strategia ON-OFF, sia mediante strategie di controllo lineari con diversi valori limite. Vengono riportati i valori limite utilizzati per ciascun clima ed orientamento (sono qui riportati soltanto i valori relativi all'orientamento Sud). Attraverso il processo di simulazione numerica vengono calcolati i valori di soglia ottimali sia per la minimizzazione del fabbisogno energetico, sia per la massimizzazione del comfort visivo, in termini di minimizzazione del fenomeno di abbagliamento).

I risultati mostrano come non sussista una grande differenza tra il fabbisogno energetico relativo ad una strategia ON-OFF e quello connesso ad una strategia lineare. Confrontando invece i fabbisogni energetici correlati a strategie di controllo mirate alla massimizzazione della prestazione energetica con quelli relativi a strategie con l'obiettivo di massimizzare il comfort visivo emergono alcune differenze. Infatti per queste ultime si ottiene un fabbisogno energetico più alto (+5% per controllo ON-OFF, +12% per controllo lineare), correlato però ad un significativo miglioramento delle condizioni di comfort visivo interno.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2002	F. Gugliermetti, F. Bisegna	Università di Roma	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	OBIETTIVO: Lighting energy use			
	LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx			
	ON (scuro)		OFF (chiaro)	CITTÀ
	1000 W/m ²		"	<i>Bolzano</i>
	1000 W/m ²		"	
	700 W/m ²		"	<i>Roma</i>
	900 W/m ²		"	
	600 W/m ²		"	<i>Catania</i>
	600 W/m ²		"	
	START	Funzione lineare di controllo	END	
	400 W/m ²		1200 W/m ²	<i>Bolzano</i>
	1000 W/m ²		1500 W/m ²	
	400 W/m ²		800 W/m ²	<i>Roma</i>
	800 W/m ²		1300 W/m ²	
	200 W/m ²		1000 W/m ²	<i>Catania</i>
	1000 W/m ²		1500 W/m ²	
	LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 100 lx			
START	Funzione lineare di controllo	END		
100 W/m ²		400 W/m ²	<i>Roma</i>	
LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx				
OBIETTIVO: Visual Comfort				
ON (scuro)		OFF (chiaro)		
400 W/m ²		"	<i>Ovunque</i>	
500 W/m ²		"		
START	Funzione lineare di controllo	END		
100 W/m ²		600 W/m ²		
250 W/m ²		800 W/m ²		
INDICATORI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Risparmio energetico sul riscaldamento e raffrescamento			
Comfort visivo	DGI (Discomfort Glare Index)			
BENCHMARKS				
EC1	(ec+clear)	EC4	(ec+low-e)	

[5] Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs

Il lavoro di Lee e Tavit, introdotto da un'estensiva review dei tipi di controllo sperimentati nelle ricerche precedenti, investiga le potenzialità, in termini di miglioramento di prestazioni energetiche e visive, collegate alla partizione della finestra in due fasce orizzontali equipaggiate con componenti elettrocromici, in modo da poter controllare questi ultimi con strategie di controllo con un diverso obiettivo. Lo studio viene condotto, a livello simulativo, per un clima caratterizzato dal prevalente fabbisogno energetico per riscaldamento invernale (Chicago) ed un clima in cui è predominante il fabbisogno energetico per raffrescamento estivo (Houston). Sono introdotte e valutate diverse strategie di controllo con obiettivi energetici e di comfort visivo. L'approccio seguito in questo lavoro consiste nel controllare la trasparenza del vetro in maniera inversamente proporzionale al valore di illuminamento sul piano di lavoro, a partire da un valore minimo di 583 lux, sotto il quale il vetro viene mantenuto nello stato di totale trasparenza. Il vetro viene controllato secondo funzioni on-off o lineari fino allo stato che permette di mantenere il valore di illuminamento interno al di sopra di 583 lx.

I risultati mostrano come la migliore strategia di controllo, in termini sia di prestazione energetica, sia di comfort visivo, risulti quella per cui il vetro nella porzione superiore della finestra viene controllato in base all'irradianza verticale esterna, mentre quello nella sezione inferiore in base all'illuminamento sul piano di lavoro.

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
OBIETTIVO: Visual Comfort				
DAYLIGHT CONTROL: illuminamento minimo 538 lx				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro)	OFF (chiaro)	ON (scuro)	OFF (chiaro)
	"	< 583 lx	"	< 583 lx
	"	< 583 lx	"	<i>sempre trasparente</i>
OBIETTIVO: Total energy use				
IRRADIANZA e ILLUMINAMENTO VERTICALI ESTERNI	START	<i>Funzione lineare di controllo</i>	END	
	63 W/m ²		315 W/m ²	<i>sempre trasparente</i>
	63 W/m ²		315 W/m ²	583 lx
	63 W/m ²		315 W/m ²	63-315 W/m ²
	63 W/m ²		95 W/m ²	583 lx
INDICATORI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Energia primaria; risparmio energetico; picchi della domanda di energia elettrica			
Comfort visivo	DGI (Discomfort Glare Index); DI (average annual daylight illuminance)			
BENCHMARKS				
CLEAR + LOW-E	GREEN + LOW-E		EC1 (vetro superiore)	EC2 (vetro inferiore)
oscuranti:	SOL E > 100 W/m ² DGI > 22			

[6] Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies

Il lavoro di Assimakopoulos et al. risulta innovativo non solo per l'introduzione di strategie di controllo di ultima generazione (fuzzy control), ma soprattutto perchè condotto sperimentalmente per un lungo periodo temporale e con feedback di utenti reali. Tuttavia esso presenta anche una limitazione, relativa alla modesta variazione del g-value tra gli stadi di massima e minima trasparenza dell'elettrocromico (0,18-0,36), fattore questo che influenza significativamente 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 in grado di adattarsi al comportamento degli utenti registrato in fase di sperimentazione.

I risultati mostrano che la migliore strategia, in termini di fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, risulta quella basata sul fuzzy control, la quale poi mostra leggere differenze nei risultati rispetto a quelli ottenuti per le strategie basate su illuminamento e irradianza. Considerando invece il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale, le strategie di controllo più efficaci nel ridurre questo parametro risultano nell'ordine: massima trasparenza, controllo mediante illuminamento e fuzzy control. Considerando il fabbisogno energetico globale la migliore strategia risulta quella basata sull'illuminamento orizzontale.

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
OBIETTIVO: Total energy use/ thermal comfort				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro)			OFF (chiaro)
	"			< 400 lx
	"			< 500 lx
	PID control			
DAYLIGHT CONTROL: illuminamento minimo 400/500 lx				
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	ON (scuro)			OFF (chiaro)
	350 W/m ²			"
DAYLIGHT CONTROL: illuminamento minimo 400/500 lx				
TIME SCHEDULE	ON (scuro)			OFF (chiaro)
	11:00-15:00			
	12:00-16:00			
FUZZY CONTROL	Basato sul controllo manuale dell'occupante registrato nel periodo di sperimentazione			
INDICATORI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione; Fabbisogno elettrico totale			
BENCHMARKS				
EC CHIARO				EC SCURO

[7] An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer

Il seguente studio di Kim et al. si concentra sulla valutazione dell'effetto dell'impiego di veneziane interne automatizzate su prestazione energetica e comfort termico e visivo.

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. Ciò implica una forte riduzione delle potenzialità del componente, poichè gli occupanti raramente controllano la veneziana nelle sue configurazioni intermedie, modificando l'inclinazione delle lamelle solamente in presenza di fenomeni di discomfort termico e/o visivo.

In questo contesto il presente lavoro propone un algoritmo di controllo sviluppato con l'obiettivo di garantire un livello di comfort ottimale per gli utenti ed al contempo massimizzare la prestazione energetica dell'ambiente in esame. La valutazione dell'efficacia del suddetto algoritmo è stata effettuata sperimentalmente, utilizzando come caso studio un edificio in Corea. La valutazione dei parametri di comfort è stata effettuata tramite la somministrazione di un questionario appositamente redatto alle persone che hanno preso parte all'esperimento.

I risultati mostrano come a livello di comfort termico (valutato tramite PMV), di risparmio energetico e di abbagliamento, l'utilizzo dell'algoritmo migliori le prestazioni del sistema di ombreggiamento dinamico quando utilizzato solamente nelle sue configurazioni totalmente chiusa o totalmente aperta.

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
OBIETTIVO: Total energy use				
ILLUMINAMENTO VERTICALE ESTERNO	ON (serrande abbassate)		OFF (serrande alzate)	
	16 000 lx		15 000 lx	
OBIETTIVO: visual and thermal comfort				
	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°)
INDICI DI PRESTAZIONE				
Comfort termico	PMV (Predictive Mean Vote) e Temperatura Superficiale del vetro			
Comfort visivo	Illuminamento orizzontale; questionario			
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione;			
BENCHMARKS				
STATICO	serrande chiuse	serrande aperte		
MANUALE	on/off condizionato	on/off non condizionato		

[8] Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations

Jonsson e Roos si sono focalizzati in questo studio sul confronto tra le prestazioni di diverse tipologie di sistemi vetrati elettrocromici, analizzando il loro comportamento quando accoppiati in vetro camera a lastre chiare, lastre con coating basso-emissivi e vetri selettivi per il controllo solare. Vengono proposte inoltre, accanto alle strategie tradizionali, alcune strategie di controllo innovative, che introducono la radiazione diretta come parametro di controllo. Inoltre la presenza dell'occupante è utilizzata come fattore decisionale per passare da una strategia di controllo che ha come OBIETTIVO la massimizzazione del comfort ad una mirata a minimizzare il fabbisogno energetico.

Aspetto innovativo dell'approccio presentato in questo lavoro risulta il fatto di utilizzare, come parametro di controllo per il cambiamento della trasparenza del vetro elettrocromico, la Radiazione solare diretta trasmessa all'interno dell'ambiente. La scelta di utilizzare tale parametro per controllare il vetro nasce dall'osservazione del fenomeno di abbagliamento, il quale si dimostra più problematico per alti angoli di incidenza dei raggi solari con le superfici vetrate. Per gli stessi angoli il fattore di trasmissione del vetro risulta massimo, per poi decrescere in maniera esponenziale per angoli di incidenza superiori ai 60°. Sono considerate in questo studio tre città caratterizzate da climi tra loro molto differenti (Miami, Denver, Stoccolma).

I risultati mostrano come, dal punto di vista energetico, il sistema vetrato con lastra selettiva risulti ottimale per i climi caldi, mentre il sistema vetrato con lastra basso-emissiva si dimostri più efficace se impiegato in climi freddi. Tuttavia non viene considerato il fabbisogno di energia elettrica relativo all'impianto di illuminazione artificiale, né viene valutato in alcun modo il comfort visivo per l'occupante.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2009	Andreas Jonsson, Arne Roos	Uppsala University	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
OBIETTIVO: Total energy use				
CARICO DI RAFFREDDAMENTO	ON (scuro) presenza			OFF (chiaro) Assenza
OBIETTIVO: Visual and thermal comfort				
IRRADIANZA VERTICALE DIRETTA INTERNA	ON (scuro)			OFF (chiaro) $I_d < 200 \text{ W/m}^2$
OBIETTIVO: Total energy use / thermal and visual comfort				
IRRADIANZA e CARICO DI RAFFREDDAMENTO	COMFORT MODE	7:00-18:00	ENERGY MODE	altri orari
	COMFORT MODE	0,5*(7:00-18:00) <i>Lo switch viene effettuato solo per metà del normale orario di ufficio</i>	ENERGY MODE	altri orari
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione;			
BENCHMARKS				
CHIARO	LOW-E ossido	LOW-E argento	CONTROLLO SOLARE	

[9] **An exploratory energy analysis of electrochromic windows in small and medium office buildings – simulated results using Energy plus**

Questo lavoro presenta l'analisi di diverse strategie di controllo e il confronto tra le prestazioni di un vetro statico tradizionale ed un vetro elettrocromico con o senza sistema di ombreggiamento mobile (veneziane interne). L'approfondita analisi presentata permette di valutare con un alto grado di accuratezza l'effettiva efficacia dell'utilizzo di una finestra elettrocromica rispetto ai sistemi di oscuramento tradizionali. Vengono considerati per questo studio tre tipi di vetro elettrocromico, caratterizzati da diversi valori di fattore solare e trasmissione visibile. Gli ambienti presi in esame sono due uffici di diverse dimensioni, un ufficio cellulare (piccolo) e di media grandezza (medio). Le strategie di controllo si basano su soluzioni ON-OFF (solo stati estremi del vetro) e la loro efficacia viene valutata, a livello simulativo, per 5 città con climi tra loro diversi (Chicago, Baltimore, Atlanta, Houston, Las Vegas).

Le prestazioni di un vetro tradizionale (con caratteristiche simili a quelle del vetro elettrocromico nello stato di massima trasparenza) sono confrontate con quelle relative al vetro elettrocromico: entrambi i componenti sono accoppiati ad un sistema di veneziane interno, regolato con l'obiettivo di minimizzare il fenomeno di abbagliamento oppure al fine di garantire il requisito minimo di illuminamento sul piano di lavoro (500 lx).

Emerge innanzitutto dall'analisi presentata la necessità di considerare la dimensione dell'ufficio e delle finestre al fine di selezionare il sistema vetrato e la strategia di controllo più efficaci per minimizzare i consumi energetici e/o massimizzare il comfort visivo.

Nel caso di un **ufficio piccolo** (5,5 m²; WWR=0,2) infatti il sistema vetrato più performante risulta essere quello con elevati valori di trasmissione visibile e fattore solare, benché il fabbisogno energetico risulti, per molte strategie che prevedono l'utilizzo dell'elettrocromico, equiparabile a quello relativo alle strategie che contemplano l'impiego della veneziana. Per quanto concerne l'aspetto energetico, dunque, l'impiego di un vetro elettrocromico non risulta conveniente, se non per alcuni climi tra quelli analizzati (Baltimora, Houston).

Nel caso di un **ufficio di dimensioni medie** (50 m²; WWR=0,3), invece, l'impiego del vetro elettrocromico, comparato al vetro tradizionale statico, si dimostra in grado di migliorare la prestazione energetica dell'ambiente, consentendo una riduzione del fabbisogno energetico che varia dal 3% al 6%.

Si può concludere che il risparmio energetico collegato all'utilizzo di un vetro elettrocromico sia fortemente dipendente dal clima, dalle caratteristiche geometriche dello spazio in esame, dal WWR e soprattutto dal tipo di strategia di controllo utilizzata. In generale, se gli uffici sono di dimensioni ridotte risulta conveniente utilizzare un vetro elettrocromico con alto fattore solare sia per climi freddi che per quelli caldi. Per gli uffici di medie dimensioni invece risulta più efficace l'impiego di un vetro elettrocromico con basso fattore solare. Il risparmio energetico, per entrambe le tipologie di uffici analizzate, derivante dall'impiego di una strategia di controllo per il vetro elettrocromico risulta variare 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
DGI- CONTROLLO DELL'ABBAGLIAMENTO	OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort			
	ON (scuro) DGI > 20	DAYLIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx		OFF (chiaro) assenza
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort			
	ON (scuro)			OFF (chiaro) < 500 lx
DGI E ILLUMINAMENTO	OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort			
	ON (scuro) DGI > 20			OFF (chiaro) < 500 lx
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione;			
BENCHMARKS				
EC TRASP	no blinds		EC TRASP	blinds se $I > 100 \text{ W/m}^2$
EC TRASP	blinds se cooling need e $I > 100 \text{ W/m}^3$		EC TRASP	no blinds (lights 500 lx)
EC TRASP	blinds se cooling need e $I > 100 \text{ W/m}^3$ (lights 500 lx)		EC TRASP	blinds se DGI > 20
EC TRASP	always blinds (lights 500 lx)			

[10]End user impacts of automated electrochromic windows in a pilot retrofit application

In questo studio vengono sottolineati i limiti delle analisi numeriche, condotte attraverso i software di simulazione correntemente disponibili, relativamente a tecnologie elettrocromiche. Per esempio il fatto di non considerare il comportamento degli occupanti, fattore che può influenzare significativamente le prestazioni energetiche e visive del sistema trasparente, può portare a un elevato grado di incertezza del risultato finale. In questo contesto Lee et al. presentano una ricerca sperimentale effettuata su una sala conferenze a Washington D.C., orientata a Est, in cui agli occupanti viene permesso di operare manualmente lo stato del vetro elettrocromico e le veneziane interne presenti. La ricerca viene condotta su un periodo di 15 mesi. I sensori registrano lo stato del vetro e verificano l'eventuale incoerenza con lo stato previsto dalla strategia di controllo considerata. La valutazione del livello di comfort visivo considera dunque l'operato degli utenti, i quali si presume operino sullo stato del sistema per ovviare ad eventuali situazioni di discomfort. Per la valutazione dei parametri di comfort visivo sono stati considerati sia i casi in cui lo stato del vetro era diverso da quello previsto dalla strategia di controllo, sia i casi in cui veniva modificata la configurazione delle veneziane al fine di controllare la luce naturale entrante e/o ridurre fenomeni di abbagliamento.

Esaminando i risultati si nota come l'azione dell'occupante abbia modificato lo stato del vetro elettrocromico, rispetto a quello previsto dalla strategia di controllo, per una quota di tempo che va dal 3% al 6% delle ore di occupazione. È possibile osservare come in molti casi l'utente anticipasse di poco lo stato del vetro in programma di lì a poco secondo la strategia di controllo. Viene inoltre fatto notare dagli autori che spesso gli utenti provvedevano a modificare lo stato del vetro, anche se già in stato di cambiamento, per assicurarsi che questo stesse effettivamente cambiando stato oppure a causa del troppo tempo necessario alla variazione. Le veneziane risultano utilizzate con alta frequenza soprattutto nel periodo compreso tra Dicembre e Aprile, anche se mai in modo tale da coprire l'intera superficie finestrata. Ciò viene interpretato dagli autori come un possibile indicatore della disponibilità degli utenti a sopportare una situazione di discomfort pur di mantenere una visione verso l'ambiente esterno.

All'attività sperimentale è stata affiancata un'attività simulativa, effettuata mediante l'utilizzo di del software EnergyPlus, volta a valutare numericamente le condizioni dell'ambiente in esame in presenza di una tecnologia vetrata statica tradizionale. Dal confronto tra dati simulativi relativi al vetro statico tradizionale e dati sperimentali relativi al componente elettrocromico emerge come la temperatura superficiale di quest'ultimo, nelle giornate fredde, risulti più alta rispetto a quella relativa al vetro statico di un valore compreso tra 12°C e 17°C. Nelle giornate calde non vengono registrate tra i due componenti differenze di temperatura superficiale significative.

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. L'impiego di un vetro elettrocromico, secondo il presente studio, consente di ridurre, di un valore compreso tra il 39% e il 48%, il fabbisogno energetico relativo all'utilizzo di un vetro statico tradizionale.

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
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
LIVELLO DI LUCE ESTERNA VERTICALE (da sensore commerciale)		ON (scuro)		OFF (chiaro)
	pannelli superiori	3000 cd		2700 cd
	pannelli inferiori	1800 cd		1600 cd
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
IRRADIANZA ESTERNA VERTICALE	DAYLIGHT CONTROL: illuminamento massimo 377 lx			
		ON (scuro)		OFF (chiaro)
	pannelli superiori	223 W/m ²		
	pannelli inferiori	91 W/m ²		
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione; Carico elettrico di picco			
Comfort termico:	PPD (Percentage of People Dissatisfied)			
Comfort visivo:	Illuminamento verticale; settaggio allo stato scuro e utilizzo della veneziana			
BENCHMARKS				
FINESTRA ESISTENTE				

[11] Performance assessment of SageGlass® electronically tintable glazings

In questo articolo l'autore confronta la prestazione relativa a due sistemi vetrati con elettrocromico (doppio e triplo) con quella di sistemi vetrati statici dotati di veneziane esterne controllate manualmente. L'analisi è condotta a livello simulativo su un edificio ad uffici posizionato in quattro città caratterizzate da climi tra loro molto differenti (Londra, Francoforte, Madrid, Copenhagen)

Lo stato del vetro elettrocromico viene regolato tramite un algoritmo che, a seconda della presenza o meno di radiazione diretta, implementa una strategia basata sul controllo dell'abbagliamento piuttosto che una basata sulla massimizzazione della penetrazione di luce naturale in ambiente. La facciata in esame è tripartita orizzontalmente in tre sezioni, ciascuna controllata in maniera indipendente dalle altre. A seconda dell'altezza del sole sull'orizzonte la trasparenza di due di queste tre sezioni viene diminuita, mantenendo inalterata la trasparenza della sezione restante, al fine di garantire un adeguato livello di illuminamento sul piano di lavoro, eliminando al contempo il rischio di abbagliamento.

I risultati mostrano che l'utilizzo del vetro elettrocromico risulta più efficace rispetto alle tecnologie vetrate tradizionali accoppiate ad una veneziana esterna. La diminuzione del fenomeno di abbagliamento tramite il solo utilizzo del vetro elettrocromico presuppone però una velocità di variazione di stato nell'ordine dei pochi minuti, a fronte dei 15-20 minuti realmente necessari per effettuare tale operazione. Viene inoltre sottolineato che il costo del vetro elettrocromico risulta simile a quello di un vetro statico, se in questo si considerano anche le voci di costo relative al montaggio ed alla manutenzione degli oscuranti interni ed esterni, indispensabili per evitare abbagliamento e problemi di comfort termico. Una facciata ventilata risulta invece più costosa di una tecnologia elettrocromica.

ANNO	AUTORE	ENTE O UNIVERSITÀ	TIPO DI ANALISI	OBIETTIVO
2013	Dan Jestico	SAGE Electrochromics, Inc.	Simulazione	Comfort visivo, Energetico
OBIETTIVO: Visual Comfort (Glare)				
LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 400 lx				
<i>Con cielo sereno e sole diretto in facciata</i>				
	a	Pannello superiore	Medio	inferiore
ALTITUDINE SOLARE	0-18°			x
	18-36°		X	x
	36-54°	x	X	x
	54-72°	x	X	
	72-90°	x		
OBIETTIVO: Visual Comfort (Daylight)				
<i>Con cielo coperto o in assenza di sole diretto in facciata, periodo di non riscaldamento</i>				
	ON (scuro)	Pannello superiore	Medio	inferiore
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	$E_{or} > 1000$ lx	$T_v = 40\%$	$T_v = 40\%$	$T_v = 40\%$
	ricalcolo: se			
	$E_{or} > 1000$ lx	$T_v = 20\%$	$T_v = 20\%$	$T_v = 20\%$
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione; Emissioni CO2; Costo relativo al fabbisogno di energia e dovuti alla taglia dell'impianto; Picco della domanda di energia elettrica.			
Comfort termico:	PMV (Predictive Mean Vote); PPD (Percentage People of Dissatisfied)			
BENCHMARKS				
DGU40				FACCIATA VENTILATA
DGU $T_{vis} 60/g28$ (external blinds)	TGU $T_{vis} 53/g24$ (external blinds)			DGU $T_{vis} 17/g20$ (external blinds)

[12]Simulation-based support for product development of innovative building envelope components

In questo studio, Loonen et al. si concentrano sull'influenza della selettività del sistema vetrato dinamico attivo su indici prestazionali energetici e di comfort visivo. Viene presentato anche un'analisi relativa all'applicazione di diverse strategie di controllo ed alla comparazione della loro prestazione con quella relativa a sistemi statici dotati di oscuranti interni ed esterni. Quest'analisi è volta ad identificare la strategia di controllo, basata sull'illuminamento interno orizzontale sul piano di lavoro, che consente il più alto miglioramento delle prestazioni rispetto a dei sistemi vetriati tradizionali statici.

Viene inoltre presentata un'analisi di sensitività volta a valutare l'influenza dell'orientamento e del WWR sulle prestazioni del sistema trasparente dinamico al variare della trasparenza di quest'ultimo, ma mantenendo costante rapporto *trasmissione luminosa/trasmissione solare*. All'aumentare di questo rapporto è osservare un significativo miglioramento sia in termini di prestazione energetica, sia in termini di comfort visivo.

I risultati mostrano due ipotetiche strade per il miglioramento delle prestazioni dei componenti elettrocromici: la prima consiste nell'aumentare il più possibile l'intervallo di variazione dei parametri termo-ottici del vetro elettrocromico; la seconda strada consiste invece nel definire specificatamente caso per caso, valutando le condizioni al contorno e le caratteristiche specifiche, gli aspetti del componente dinamico su cui intervenire al fine di ottenere un miglioramento delle prestazioni.

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
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE INTERNO	ON (scuro) 500 lx			OFF (chiaro) "
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
ILLUMINAMENTO VERTICALE ESTERNO	ON (scuro) 20 000 lx			OFF (chiaro) "
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
TEMPERATURA INTERNA	ON (scuro) 24° C			OFF (chiaro) "
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
TEMPERATURA ESTERNA	ON (scuro) 24° C			OFF (chiaro) "
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
TIME SCHEDULE	ON (scuro) 1/05 - 30/09			OFF (chiaro) 1/10 - 31/04
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno energetico per riscaldamento, raffrescamento e illuminazione artificiale			
Comfort visivo:	Luminanza; illuminamento; DGP (Discomfort Glare Index); UDI (Useful Daylight Autonomy)			
BENCHMARKS				
DGU + overhang				DGU + venetian blinds

[13]Smart windows with dynamic spectral selectivity – a scoping study

Partendo da una considerazione di carattere generale sulle potenzialità di miglioramento della prestazione energetica collegate al controllo della radiazione infrarossa vicina (NIR), quantificabili tra il 3% e il 9%, questo studio indaga, per diversi WWR, le prestazioni di tre tipi di vetri dinamici ideali. Questi sono in grado di variare le proprie trasmissioni e riflessioni spettrali relativamente a tre diverse parti dello spettro elettromagnetico. Trasmissione e riflessione del componente denominato *VLT* variano nella parte visibile dello spettro elettromagnetico, quelle relative al componente denominato *NIR* variano nella parte di infrarosso vicino, mentre quelle relative al componente chiamato *LONGWAVE* variano nella parte di infrarosso lontano.

I risultati mostrano come tecnologie che modulano la trasmissione nel campo NIR permettano una riduzione del fabbisogno di energia per l'illuminazione artificiale, aumentando però il fabbisogno energetico per raffrescamento rispetto a tecnologie le cui proprietà termo-ottiche variano nella parte visibile dello spettro elettromagnetico (VLT). Queste ultime consentono invece, tra le tre tecnologie analizzate, di ottenere la maggiore riduzione del fabbisogno di energia per raffrescamento. La tecnologia basata sulla variazione dell'emissività (LONG WAVE) risulta essere la meno performante.

A seconda del luogo analizzato (Stoccolma, Amsterdam, Berlino, Madrid), e del relativo clima, è possibile osservare una maggior efficacia di una tecnologia rispetto alle altre. Inoltre l'orientamento dello spazio analizzato si dimostra influenzare significativamente i consumi energetici finali. Il progettista deve essere quindi in grado di selezionare la tecnologia dinamica più adatta a seconda delle caratteristiche e delle specificità di ciascuna situazione progettuale.

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
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx				
IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA		ON (scuro)		OFF (chiaro)
	VLT	250 W/m ²		"
	NIR	250 W/m ²		"
OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort				
LIGHT CONTROL: illuminamento minimo 500 lx				
TEMPERATURA <i>(in periodo senza riscaldamento)</i>		ON (scuro)		OFF (chiaro)
	LONGWAVE	Ti < Te		"
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione;			
Comfort visivo	DGP (Discomfort Glare Index); UDI (Useful Daylight Autonomy)			
BENCHMARKS				
DGU + low-e				

[14] **Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates**

In questo articolo viene presentato lo stato attuale delle ricerche nel campo delle strategie di controllo e delle metodologie per investigare numericamente gli effetti di queste su aspetti energetici e di comfort. 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 adottabile per le analisi di involucri adattivi e per le 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*), strategie di controllo basate su una logica *if-then* che associano a forzanti esterne presenti o passati un diverso stato del vetro, e RHC (*Receding Horizon Control*) che uniscono agli input relativi al momento presente una simulazione dello stato futuro utilizzata per ottimizzare il controllo del vetro nel presente.

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 dallo strato fotovoltaico del PVC (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 il fabbisogno energetico, ma non le prestazioni visive. In climi dove il riscaldamento è invece equiparabile al raffrescamento, le diverse strategie risultano in assoluto meno efficaci, in termini di risparmio energetico, rispetto al caso statico ed in confronto ai climi caldi, ma comunque migliorano sensibilmente le prestazioni visive. 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, la minimizzazione dell'abbagliamento contrasta con la minimizzazione dei fabbisogni 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, Energetico
Rule Based Control (RBC)				
3. IRRADIANZA VERTICALE ESTERNA	OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort			
	trasparente t = 0,5	$0,2 * I_{v, ext}$ t = 0,36	$0,4 * I_{v, ext}$ t = 0,27	$0,7 * I_{v, ext}$ t = 0,17 $1 * I_{v, ext}$ t = 0,16
4. GLARE INDEX	OBIETTIVO: Visual Comfort			
	STATO i DGP≠A	...	...	STATO f DGP≠A
5. FABBISOGNO ENERGETICO	OBIETTIVO: Total energy use			
	<i>minimizzare il fabbisogno energetico (riscaldamento, condizionamento e illuminazione)</i>			
6. GLARE INDEX E FABBISOGNO ENERGETICO	OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort			
	STATO i DGP≠A	...	...	STATO f DGP≠A
<i>minimizzare il fabbisogno energetico (riscaldamento, condizionamento e illuminazione)</i>				
Receding Horizon Control (RHC)				
7. ENERGY USE	OBIETTIVO: Total energy use			
	<i>minimizzare l'utilizzo di energia - controllo model predictive</i>			
8. GLARE INDEX	OBIETTIVO: Total energy use / Visual Comfort			
	STATO i DGP≠A	...	...	STATO f DGP≠A
<i>minimizzare l'utilizzo di energia - controllo model predictive</i>				
9. GLARE INDEX, NET ENERGY USE, GRID INTERACTION	OBIETTIVO: Total Net energy use / Visual Comfort			
	STATO i DGP≠A	...	...	STATO f DGP≠A
<i>minimizzare l'utilizzo di energia netta - controllo model predictive</i>				
INDICI DI PRESTAZIONE				
Fabbisogno energetico	Fabbisogno di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione; Fabbisogno netto annuo; Interazione con la rete elettrica.			
Comfort visivo	DGP (Discomfort Glare Index); UDI (Useful Daylight Autonomy)			
BENCHMARKS				
PVC trasparente				PVC opaco

Riferimenti bibliografici Appendice A

1. R. Sullivan, E.S. Lee, K. Papamichael, M. Rubin, S. Selkowitz. "Effect of switching control strategies on the energy performance of electrochromic windows", Atti di: International Symposium on Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII, 18-22 Aprile 1994, Friburgo, Germania, vol 2255, 1994, pp. 443-455.
2. J. Karlsson, B. Karlsson and A. Roos. "Control strategies and energy saving potentials for variable transmittance windows versus static windows", Atti di: 3rd ISES Europe Solar Congress (Eurosun 2000), 19-22 Giugno 2000, Copenhagen, Danimarca.
3. J. Karlsson. "Control system and energy saving potential for switchable windows", Atti di: Building Simulation 2001: 7th International Conference of IBPSA, 13-15 Agosto, Rio de Janeiro, Brasile. IBPSA, 2001, pp. 199-206.
4. F. Gugliermetti, F. Bisegna. "Visual and energy management of electrochromic windows in mediterranean climate", Building and Environment, 38:3 (2003), pp. 479-492.
5. E.S. Lee, A.Tavil. "Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs", Building and Environment, 42:6 (2007), pp. 2439-2449.
6. M.N. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, G. Guarracino. "Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies", Building and Environment, 42:8, (2007), pp. 2829-2834
7. J.H. Kim, Y.J. Park, M.S. Yeo, Kwang-Woo Kim. "An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer", Building and Environment, 44:7 (2009), pp. 1517-1527.
8. A. Jonsson, A. Roos. "Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations", Solar Energy, 84:1 (2010), pp. 1-9.
9. D.B. Belzer. An exploratory energy analysis of electrochromic windows in small and medium office buildings – simulated results using energyplus, pp. 1-50, Pacific Northwest National Laboratory (U.S.), Richland, Washington, 1 Agosto 2010.
10. E.S. Lee, E.S. Claybaugh, M. LaFrance. "End user impacts of automated electrochromic windows in a pilot retrofit application", Energy and Buildings, 47 (2012), pp. 267-284.
11. Dan Jestico. "Performance assessment of SageGlass® electronically tintable glazings", pp. 1-10, 2013, consultato su: https://www.sageglass.com/sites/default/files/etg_j_final.pdf
12. R.C.G.M. Loonen, S. Singaravel, M. Trčka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen. "Simulation-based support for product development of innovative building envelope components", Automation in Construction, 45 (2014), pp. 86-95.
13. R.C.G.M. Loonen, J.L.M. Hensen. "Smart windows with dynamic spectral selectivity – a scoping study", Atti di: Building Simulation 2015: 14th International Conference of IBPSA, 7-9 Dicembre 2015, Hyderabad, India. IBPSA, 2015, pp. 2158-2165.
14. F. Favoino, F. Fiorito, A. Cannavale, G. Ranzi, M. Overend. "Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates", Applied Energy, 178 (2016), pp. 943-961.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Valentina Serra (Politecnico di Torino) – Responsabile scientifico

Laureata in Architettura, Ph.D. in Fisica Tecnica, è attualmente professore associato di Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino. Nel 2017 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale per professore universitario di I fascia.

Tiene corsi di primo, secondo e terzo livello sui temi della fisica dell'edificio e delle tecniche di controllo ambientale ed è stata supervisor di 6 tesi di dottorato.

Opera all'interno del Gruppo di Ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment) costituito da 10 docenti strutturati e circa 20 giovani ricercatori, tra dottorandi, assegnisti e borsisti e coordina una specifica unità di ricerca sui temi dell'involucro edilizio avanzato.

Coinvolta in numerosi progetti di ricerca nazionale ed internazionale e in contratti di consulenza e di ricerca con enti pubblici e privati, sia come ricercatore che in qualità di responsabile scientifico (attualmente è responsabile scientifico per il Politecnico di Torino di due progetti H2020, Wall-ACE e Mobistyle), la sua attività è prevalentemente indirizzata sul tema della modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale di componenti di involucro edilizio trasparente e opaco a carattere innovativo (tra i principali vetrate a doppia pelle, vetrate a prestazione variabile, schermature solari, sistemi di facciata adattivi e responsivi, Living Wall Systems e coperture a verde naturale ed artificiale, intonaci termoisolanti con aerogel, laterizi ad elevata prestazione, camini di luce)

Co-Referente dei laboratori per la caratterizzazione termica di materiali, componenti e sistemi edilizi (TWINS-outdoor test cells, camera climatica e piastra calda) per il Dipartimento Energia.

Membro del Comitato Scientifico di Conferenze nazionali ed internazionali, è stata membro del Comitato Organizzatore di IBPC 2015 e co-chair dell'International conference SEB 2016. Attualmente è Presidente della Commissione Cultura di AiCARR.

Revisore per riviste internazionali, tra le principali Energy and Buildings, Building and Environment, Building Simulation, Journal of Architectural Science, Energy Efficiency, Energies, Sustainability, è autrice di circa 100 lavori, di cui circa la metà su riviste internazionali indicizzate (WOS and SCOPUS).

Luigi Giovannini (Politecnico di Torino)

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

Manuela Baracani (Politecnico di Torino)

Laureata con il massimo dei voti presso il Politecnico di Torino (Laurea Magistrale in *Architettura Costruzione Città*) nel 2018 con una tesi dal titolo *Valutazione della prestazione energetica e visiva di sistemi trasparenti elettrocromici e di differenti strategie di controllo – caratterizzazione sperimentale e simulazioni numeriche*. Tesi correlata da Valentina Serra e Luigi Giovannini e risultata

vincitrice del *Premio Tesi AiCARR 2018*. Nel 2015 ha collaborato con lo studio di Architettura Bladidea (Torino) mentre nel 2017 è risultata vincitrice di un bando per collaborazioni part-time, presso il Politecnico di Torino, per una posizione come collaboratrice alla didattica per il corso di Fisica tecnica ambientale. Svolge attualmente attività professionale in qualità di progettista.

Fabio Favoino (Politecnico di Torino)

Fabio Favoino, è attualmente Assistant Professor presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, all'interno del gruppo di ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment). Si è laureato in Ing. Edile con doppia laurea al Politecnico di Torino e Milano nel 2010, dopo un'esperienza formativa alla TU Delft e nell'Alta Scuola Politecnica, con una tesi di laurea vincitrice del premio di tesi di laurea AICARR e finalista come miglior tesi REHVA. Dal 2010 alla fine del 2012 lavora come ricercatore al Politecnico di Torino nel gruppo TEBE (Technology Energy Building and Environment), partecipando a numerosi progetti di ricerca regionali, nazionali e europei, sul tema dell'efficienza energetica degli edifici e delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio. Dal 2013 al 2016 svolge il dottorato in Ingegneria all'Università di Cambridge, nel gruppo di ricerca Glass and Façade Technology, guidato dal Dr. Mauro Overend, sul tema della progettazione ed ottimizzazione di componenti di involucro edilizio dinamici, sponsorizzato dal Research Council britannico (EPSRC) e dallo studio di progettazione di facciate Wintech Ltd. Inoltre è coinvolto in diversi progetti nazionali ed europei sulla progettazione di involucri edilizi compositi ad alte prestazioni energetiche e strutturali. Nella sua attività didattica è compresa la partecipazione a diversi corsi in Fisica Tecnica Ambientale, Fisica dell'edificio, Impianti edilizi e Progettazione di Involucro edilizio al Politecnico di Torino, Università di Architettura IUAV di Venezia, Università di Cambridge e in altri corsi professionali. È co-autore del progetto europeo Cost Action europea TU1403 – Adaptive Façade Network, rappresentante UK all'interno della Cost Action e Task Leader per la simulazione di componenti dinamici di involucro. A conclusione del suo dottorato dal 2016 al 2018 lavora come Senior Façade Engineer presso lo studio di Ingegneria Eckersley O'Callaghan, occupandosi delle progettazioni di facciate ad alte prestazioni per uffici, residenziale, commerciale e museale collaborando con architetti riconosciuti internazionalmente (F+P, ZHA, BIG, NBBJ), e guidando la ricerca e sviluppo all'interno dello studio. A metà 2018 inizia la sua attività di ricerca e didattica come Assistant Professor presso il gruppo TEBE; al Politecnico di Torino, occupandosi di involucri ad alte prestazioni nell'ambiente costruito e non (automobilistico, marino etc.). Ha presentato la sua attività di ricerca in numerose conferenze internazionali e attraverso pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali, inoltre è reviewer di giornali quali Energy and Buildings, Building and Environment, Applied Energy, Journal of Façade Design and Engineering, ed associate editor di Journal of Glass Design and Engineering.

Alfonso Capozzoli (Politecnico di Torino)

Alfonso Capozzoli (1979), ingegnere meccanico e dottore di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici, è attualmente professore associato di Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino. Nel 2018 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale alle funzioni di professore universitario di I fascia.

È docente nei corsi di laurea in Architettura per il progetto sostenibile e in Ingegneria Energetica del Politecnico di Torino. Nel Dipartimento di Energia opera nel gruppo di ricerca TEBE ed è autore di circa 80 pubblicazioni scientifiche sugli impianti di climatizzazione, sulla simulazione energetica dinamica della prestazione degli edifici, sulla fisica dell'edificio, sul controllo dell'umidità e sull'applicazione di modelli inversi e tecniche di data analytics per la gestione e la diagnostica energetica degli edifici. È stato chairman in diverse sessioni tecniche in conferenze internazionali sulla prestazione energetica degli edifici e membro di comitati organizzatori/scientifici. Nel 2016 ha ricoperto il ruolo di general chair di una conferenza internazionale (SEB 16). È stato membro del consiglio direttivo della sezione italiana di IBPSA (International Building Performance Simulation Association).

È attivo in progetti di ricerca sulla prestazione energetica degli edifici finanziati dalla Commissione Europea e in vari gruppi di ricerca dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA). È responsabile scientifico di diversi contratti di ricerca per il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino. È revisore per prestigiose riviste internazionali nei settori della fisica dell'edificio, ed è stato valutatore di progetti di ricerca del settore. Per il Politecnico di Torino svolge il ruolo di academic advisor per i programmi Erasmus relativamente alla mobilità degli studenti da/verso il DAD (co-responsabile per l'area EUROPA).

Valerio Roberto Maria Lo Verso (Politecnico di Torino)

Laurea in Architettura con il massimo dei voti con una tesi sul comfort visivo, PhD in Fisica Tecnica con una tesi sulla simulazione della luce naturale mediante cieli artificiali. La tesi verte sul progetto, realizzazione e collaudo di un laboratorio con sole e cielo artificiali per lo studio dell'illuminazione naturale su modelli in scala, unico in Italia. Nel 2006-07, ricercatore post-doc ('post-doc visiting fellow') presso il National Research Council of Canada di Ottawa (Ontario, Canada), sul tema dell'illuminazione naturale, dell'integrazione illuminazione naturale – illuminazione artificiale e del comfort visivo per la realizzazione di architetture sostenibili. Attualmente è ricercatore confermato e professore aggregato presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino nell'ambito del SSD 'Fisica Tecnica Ambientale'. Opera nel Gruppo di Ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment), costituito da 10 docenti strutturati e circa 20 giovani ricercatori, tra dottorandi, assegnisti e borsisti. Nel 2018 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale per professore universitario di II fascia.

I suoi ambiti di ricerca riguardano in particolare l'illuminazione artificiale e naturale, approfondendo con attività sperimentali in campo, mediante software e con modelli in scala gli aspetti legati al comfort visivo, alla progettazione e caratterizzazione di sistemi trasparenti e schermanti e al risparmio energetico attraverso l'incremento dell'uso di luce naturale e l'integrazione luce naturale-luce artificiale. Come principale ambito di ricerca, analizza le prestazioni visive, termiche e energetiche di componenti di facciata innovativi a comportamento responsivo (utilizzo di alghe come sistemi di schermatura, vetri termocromici, termotropici, elettrocromici), comprese le ricadute ambientali in termini di comfort e accettabilità da parte dell'utenza (attraverso misure in campo, simulazioni, questionari distribuiti in ambienti reali). Altri temi di ricerca riguardano lo studio del comfort e del corrispondente carico di lavoro mentale in ambienti caratterizzati da compiti visivi severi, quali sale di controllo o abitacoli di velivoli militari o di automobili o ancora all'interno di strutture ospedaliere, in cui viene analizzata la risposta sia dei degenti, sia del personale medico-infermieristico.

Tiene corsi di primo, secondo e terzo livello (in italiano e in inglese), nonché lezioni a corsi professionalizzanti, sui temi della fisica dell'edificio e delle tecniche di controllo ambientale ed è supervisor di tesi di dottorato. Dal 2007 al 2013 è stato membro del Collegio Docenti del Dottorato di Ricerca in "Psicologia applicata e ergonomia" dell'Università degli Studi di Torino.

E' autore di oltre 70 pubblicazioni, di cui circa la metà su riviste internazionali indicizzate (WoS and SCOPUS). Uno di questi articoli è risultato vincitore del premio Leon Gaster come miglior articolo pubblicato nel 2010 sulla rivista internazionale 'Light Research & Technology'. E' inoltre autore del volume "Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale", 3 paragrafi per il "Manuale di progettazione illuminotecnica", (Mancosu Editore), e un paragrafo per il volume "Sustainable indoor lighting" (Springer, in inglese).

Ha fatto parte della Divisione 3 della CIE, in particolare nell'ambito dei Technical Committees TC 3-47 e TC 3-51, risultando co-autore della pubblicazione CIE TC 3-51, "CIE Standard General Sky Guide".

Membro del Comitato Scientifico di Conferenze nazionali ed internazionali, è stato membro del Comitato Organizzatore delle conferenze internazionali IBPC 2015 e SEB2016, attualmente membro del comitato scientifico dell'International conference SEB 2018. Attualmente è Presidente della

Commissione Cultura di AiCARR. E' inoltre Associate Editor della rivista Journal of Daylighting (indicizzata su Scopus).

Revisore per riviste internazionali, tra cui principali Energy and Buildings, Building and Environment, Building Simulation, Indoor and Built Environment, Lighting Research and Technology, Leukos, Energy Efficiency, Energies, Sustainability.

Anna Pellegrino (Politecnico di Torino)

Laureata in Architettura, dottore di ricerca in Energetica, e dal 2005 professore associato nel settore della Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino.

Svolge la propria attività scientifica presso il Dipartimento Energia "Galileo Ferraris" del Politecnico di Torino, nell'ambito del gruppo di ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment). Il settore prevalente di interesse è quello dell'illuminotecnica: dalle tecnologie per l'illuminazione e il controllo alle loro applicazioni, dal rapporto luce-confort e luce-energia a quello luce-conservazione e valorizzazione dei beni culturali, dalla progettazione alla verifica, con riferimento all'illuminazione naturale e artificiale di ambienti interni ed esterni.

Opera nell'ambito di progetti di ricerca o di contratti di consulenza con enti pubblici e privati, sia come ricercatore che nel ruolo di referente scientifico. Riveste inoltre il ruolo di tutore di dottorandi di ricerca e responsabile scientifico di assegni e borse di ricerca.

In ambito didattico è titolare di corsi di primo e secondo livello inerenti i temi dell'illuminotecnica e della Fisica Tecnica Ambientale nell'ambito dei Corsi di Laurea di Architettura e di Ingegneria Energetica del Politecnico di Torino.

Opera come revisore per progetti di Ricerca internazionali e per riviste internazionali quali Building and Environment, Energy and Buildings, Sustainable Cities and Societies, Energy Efficiencies, etc.

Membro dal 2018 del Comitato esecutivo e direttivo dell'Associazione AIDI (Associazione Italiana di Illuminazione), nonché presidente della delegazione territoriale Piemonte, Liguria e Valle d'Aosta.