



Ricerca di Sistema elettrico

## Controlli avanzati ed integrati di elementi di involucro trasparente dinamico per Smart Zero Energy Buildings

F. Favoino, M. Baracani, G. Gennaro, L. Giovannini, V. Serra

## Controlli avanzati ed integrati di elementi di involucro trasparente dinamico per Smart Zero Energy Buildings

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

Gruppo di Lavoro:

F. Favoino, Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

M. Baracani, Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

G. Gennaro, Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

L. Giovannini, Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

Gennaio 2022

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: LA 18 Controlli avanzati ed integrati di elementi di involucro trasparente dinamico per smart Zero Energy Buildings

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "GESTIONE ENERGETICA NEGLI EDIFICI: DALLA SCALA DEL COMPONENTE A QUELLA DEL DISTRETTO"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico POLITO: Valentina Serra

Il gruppo di lavoro desidera ringraziare il dott. Michele Zinzi, per il supporto alla validazione dei modelli realizzati attraverso le diverse campagne di misure effettuate e per il continuo e costruttivo confronto, il prof. Alfonso Capozzoli ed il dott. Francesco Isaia, per aver contribuito alla formulazione della RC e dell'MPC volta all'implementazione in campo, all'ing. Noemi di Pierro, per il supporto alle attività sperimentali sulla cella di prova TWINS, nell'ambito della sua tesi di Laurea Magistrale, ai colleghi proff. Anna Pellegrino e Valerio Lo Verso per il supporto sugli aspetti simulativi e misuristici correlati al daylight e al comfort visivo.

## Indice

1	SOMMARIO .....	5
2.	INTRODUZIONE .....	6
3	ANALISI CRITICA SULLE TECNICHE DI CONTROLLO PER ELEMENTI DI INVOLUCRO TRASPARENTI DINAMICI.....	8
3.1	IL FINE DELL’AUTOMAZIONE IN ELEMENTI DI INVOLUCRO DINAMICI .....	8
3.2	REQUISITI E SFIDE DELL’AUTOMAZIONE DI INVOLUCRI DINAMICI .....	10
3.3	ELEMENTI, CARATTERISTICHE E LOGICHE PER INTEGRARE L’AUTOMAZIONE IN INVOLUCRI DINAMICI .....	12
3.4	CONTROLLI AVANZATI PER ELEMENTI DI INVOLUCRO TRASPARENTE .....	15
3.4.1	<i>Smart glazing e schermature solari</i> .....	15
3.4.2	<i>Apertura automatizzata delle finestre</i> .....	17
3.4.3	<i>Facciate a Doppia Pelle (Double Skin Facade, DSF)</i> .....	19
3.5	CONCLUSIONI, DIREZIONI FUTURE E SCOPO DELLA RICERCA.....	21
3.5.1	<i>Requisiti di sistemi di controllo intelligenti e distribuiti per facciate dinamiche e direzioni future</i> .....	21
4	CONTROLLO AVANZATO DEI SISTEMI DI INVOLUCRO DINAMICI IN EDIFICIO REALE .....	24
4.1	CASO STUDIO E SCOPO DEL LAVORO .....	24
4.1.1	<i>Caratteristiche del caso studio reale, edificio ENEA F40</i> .....	24
4.1.2	<i>Scopo e metodologia</i> .....	27
4.2	METODOLOGIA DI SIMULAZIONE .....	29
4.2.1	<i>Architettura di simulazione</i> .....	29
4.2.2	<i>Obiettivi – Key Performance Indicators</i> .....	32
4.3	VALIDAZIONE E CALIBRAZIONE DEI MODELLI .....	34
4.3.1	<i>Validazione e calibrazione modello termico – EnergyPlus</i> .....	34
4.3.2	<i>Validazione e calibrazione modello daylight – Radiance</i> .....	40
4.4	STRATEGIE DI CONTROLLO DEGLI ELEMENTI DINAMICI DI INVOLUCRO.....	45
4.4.1	<i>Controllo della ventilazione naturale</i> .....	45
4.4.2	<i>Controlli schermature solari</i> .....	47
4.4.3	<i>Matrice finale dei controlli a confronto</i> .....	49
4.5	RISULTATI .....	51
4.5.1	<i>Risultati dello scenario A di simulazioni (impianto di riscaldamento)</i> .....	53
4.5.2	<i>Risultati dello scenario B (impianto di riscaldamento e raffrescamento)</i> .....	66
4.6	CONCLUSIONI .....	70
5	MODELLI RIDOTTI PER IL CONTROLLO DEL COMFORT VISIVO.....	72
5.1	METODOLOGIA.....	72
5.2	DATA SET CLASSIFICATION .....	75
5.3	RISULTATI .....	77
5.4	CONCLUSIONI, LIMITAZIONI, FUTURE WORK .....	81

6	CONTROLLO AVANZATO DI VETRI DINAMICI NEL SISTEMA SPERIMENTALE TWINS.....	83
6.1	FINALITÀ E METODOLOGIA.....	83
6.2	CASO STUDIO: CELLA TWINS E VETRI DINAMICI.....	84
6.3	SISTEMI DI ACQUISIZIONE E CONTROLLO (TWINS BUILDING MANAGEMENT SYSTEM).....	85
6.3.1	<i>Field layer</i> .....	87
6.3.2	<i>Automation layer e decision-making layer</i> .....	90
6.4	CAMPAGNA SPERIMENTALE .....	92
6.5	VALIDAZIONE DEL MODELLO TERMICO .....	92
6.6	MODELLO TERMICO .....	95
6.6.1	<i>Definizione modello RC</i> .....	95
6.6.2	<i>Identificazione RC con dataset sperimentale</i> .....	99
6.6.3	<i>Identification RC con dataset sperimentale surrogato</i> .....	100
6.6.4	<i>Identificazione RC con dataset ibrido</i> .....	100
6.7	MODELLO DI DAYLIGHT.....	101
6.8	FORMULAZIONE ED IMPLEMENTAZIONE DEL MODEL PREDICTIVE CONTROL.....	104
6.8.1	<i>Funzione di costo generale e constraints (soft and hard)</i> .....	105
6.8.2	<i>Formulazione funzione di costo MPC Termico (MPC_T)</i> .....	105
6.8.3	<i>Formulazione funzione di costo MPC Termico e Daylight (MPC_T+D)</i> .....	107
6.9	ARCHITETTURA SIMULATIVA NEL CONTESTO DELL’MPC DECISION MAKING.....	109
6.10	CONTROLLI RBC BENCHMARK DI CONFRONTO.....	110
6.11	RISULTATI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE E CONFRONTI CON SIMULAZIONI .....	113
6.11.1	<i>Dataset Ottobre</i> .....	114
6.11.2	<i>Dataset Novembre</i> .....	119
6.11.3	<i>Dataset Dicembre</i> .....	123
6.12	CONCLUSIONI, REQUISITI E SFIDE DELL’MPC PER VETRI DINAMICI.....	128
7	CONCLUSIONI GENERALI ED ATTIVITÀ FUTURE .....	131
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	135
9	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	143
10	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	144

## 1 Sommario

L'attività di ricerca "Controlli avanzati ed integrati di elementi di involucro trasparente dinamico per smart Zero Energy Buildings" ha avuto lo scopo di valutare l'influenza delle strategie di controllo di tecnologie trasparenti dinamiche attive (nello specifico vetri elettrocromici e vetrate integranti schermature solari in intercapedine e ventilazione naturale) sulla prestazione energetica degli edifici e sul comfort termico e visivo. Una prima analisi critica di letteratura, ha permesso di individuare i requisiti fondamentali per i suddetti sistemi di controllo contribuendo allo standard internazionale ISO 52016-3 sul controllo di elementi dinamici di involucro. L'attività di ricerca si è divisa in due fasi principali, relative ai due casi studio analizzati.

L'analisi numerica degli effetti di diverse strategie di controllo sulle prestazioni energetiche e di comfort visivo, nonché sui carichi di picco del sistema edificio – impianto, per l'edificio F40 presso Enea Casaccia ha permesso di valutare: (i) l'efficacia di diverse strategie di controllo RBC, a partire da benchmark di letteratura, di come adeguarle al caso studio di interesse, ottimizzandole per step successivi, e di come implementarle nell'edificio in eventuali fasi successive (considerando la disponibilità di automazione, sensori e dati sulle condizioni a contorno.); (ii) l'efficacia di logiche di controllo MBC (Model Based Control) che ottimizzassero contemporaneamente condizioni di comfort visivo e termico interno, qualità dell'aria, fabbisogno energetico e carichi di picco dell'impianto di climatizzazione; (iii) la possibilità di migliorare logiche di controllo RBC, con informazioni di modelli ridotti nel campo del comfort visivo, al fine di migliorare l'efficacia dei controlli implementabili in campo. In particolare si è visto come il controllo della ventilazione naturale abbia in questo caso l'influenza maggiore sul comfort termico ed il fabbisogno di energia primaria (impatto dell'8% sul comfort termico e fino a 17 kWh/m<sup>2</sup>a sull'energia primaria), mentre il controllo delle veneziane, dato lo specifico orientamento del caso di studio, risulta in un impatto relativamente basso sul fabbisogno di energia globale (fino a 1 kWh/m<sup>2</sup>a), ma più alto per il comfort termico (6%), l'illuminamento da luce naturale (7%) ed il rischio di abbagliamento (4-6%). L'introduzione di requisiti e di un controllo basati sulla qualità dell'aria comporterebbe un aumento del fabbisogno di energia dal 34 al 40% (in base al sistema impiantistico).

La caratterizzazione sperimentale di un componente vetrato dinamico attivo, nello specifico un vetro elettrocromico (EC), integrato in una test cell esposta a condizioni climatiche reali e simulante un ambiente tipo, ha permesso di valutare i requisiti per l'implementazione in campo di strategie di controllo predittive in condizioni reali di esercizio. In particolare tale fase dell'attività di ricerca ha consentito di: (i) valutare i parametri prestazionali di riferimento (trasmissione termica, coeff. di trasmissione solare totale, trasmissione solare e luminosa) nei diversi stati di colorazione del vetro EC; (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 più modelli numerici di simulazione (bianchi, grigi e su domini fisici complementari, i.e. termico e luminoso) che ha permesso una campagna parametrica di simulazioni numeriche, nonché l'elaborazione ed implementazione di controlli MPC; (iv) la formulazione e risoluzione di un problema di ottimizzazione del controllo dei vetri dinamici rispetto a diverse funzioni obiettivo, con caratteristiche predittive (MPC, Model Predictive Control); (v) l'implementazione in campo della logica MPC, nonché il confronto simulativo con benchmark di logiche di controllo RBC (Rule Based Control), che documenta una migliore prestazione del controllo MPC (riduzione del fabbisogno di energia primaria globale tra il 2 ed il 6% rispetto al migliore RBC, riduzione del fabbisogno di illuminazione artificiale fino al 40-46% rispetto ad un RBC di riferimento, riduzione dei gradi ora di surriscaldamento fino al 15%, con un livello di illuminamento orizzontale interno sempre tra i requisiti individuati). È necessario sottolineare altresì che l'analisi ad oggi condotta è stata mirata più alla realizzazione di una infrastruttura e al test di una metodologia che alla verifica prestazionale di componenti edilizi e delle relative logiche di controllo, date alcune limitazioni insite nell'attuale facility sperimentale (oggetto a breve di ristrutturazione), rispetto a contesti edilizi reali. L'attuale implementazione ha permesso, infatti, la realizzazione di un gemello digitale e di una infrastruttura sperimentale che attia ad essere utilizzata come una piattaforma in grado di supportare il test, lo sviluppo ed il commissioning di controlli avanzati per elementi di involucro dinamici, di sensori e di sistemi di controllo, nonché di tecnologie dinamiche di involucro.

## 2. Introduzione

L'integrazione di tecnologie dinamiche trasparenti nell'involucro edilizio può influenzare largamente le prestazioni del sistema edificio – impianto sotto diversi punti di vista, grazie al controllo attivo della radiazione solare e della ventilazione naturale, influenzando la prestazione energetica, il comfort termico e visivo, la flessibilità energetica ed il profilo di domanda dell'edificio rispetto alla rete elettrica nazionale.

Tecnologie trasparenti dinamiche o responsive, sono chiamate tali perchè hanno la capacità di modulare le proprie proprietà termo-fisiche (in modo attivo o passivo), a seconda delle condizioni al contorno (climatiche ed interne, i.e. preferenze / presenza degli occupanti), per migliorare la performance dell'edificio (i.e. riduzione del fabbisogno energetico, modulazione dei carichi per il controllo ambientale, miglioramento della qualità dell'ambiente interno, interazione con l'occupante etc.). Una lista non esaustiva di questo tipo di tecnologie include facciate a doppia pelle (DSF, Double Skin Facades)[1], vetri dinamici (come elettrocromici, cristalli liquidi, termocromici, oggetto di un PTR precedente [2]) [3], schermature solari dinamiche [4], sistemi vetrati complessi (CFS, Complex Fenestration Systems) [5], sistemi di isolamento dinamico [6], PCM (Phase Change Materials) [7].

La variazione da un tipo di involucro edilizio tradizionalmente statico ad uno che può variare il suo comportamento in modo dinamico, agendo come un regolatore climatico che modula le sue proprietà per raggiungere una performance edilizia ottimale, non è un processo semplice. Infatti, in questo tipo di sistemi il processo decisionale di controllo di tali componenti, che deve avvenire in tempo reale, deve essere attuato in sinergia con gli altri componenti impiantistici, aggiungendo ulteriore complessità. Questo è particolarmente rilevante quando questi elementi di involucro possono influenzare domini fisici diversi (i.e. termico, luminoso, qualità dell'aria) contemporaneamente [8]. Per questo motivo, 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 nell'ambito del progetto PTR 2020-2021 dal titolo "Controlli avanzati ed integrati di elementi di involucro trasparente dinamico per smart Zero Energy Buildings", con lo scopo di valutare l'influenza delle strategie di controllo di tecnologie trasparenti dinamiche attive sulle prestazioni di edifici intelligenti, con i seguenti obiettivi (la cui attività e risultati sono descritti in specifiche sezioni del presente report), in relazione a quanto previsto nell'allegato tecnico del progetto:

- (i) Sviluppare un'analisi critica sulle tecniche di controllo più utilizzate per elementi di involucro trasparenti dinamici (obiettivo a.), che permetta di individuare i requisiti sia di implementazione che di simulazione di controlli integrati ed avanzati per componenti di involucro dinamici basati su modelli predittivi (obiettivo b.), e che contribuisca alla revisione di normative tecniche in tema di involucri edilizi dinamici ed efficienza energetica, quali la ISO 52016-3 "Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 3: Calculation procedures regarding adaptive building envelope elements" (obiettivo g.) (Sezione 3);
- (ii) Costruzione e calibrazione di modelli energetici ingegneristici relativi ai due mock-up oggetto di studio (Sezione 4.3 e Sezione 6.4, 6.5 e 6.6), che replicassero i fenomeni termofisici ed ottici negli ambienti oggetto di studio, per permettere la predizione dell'effetto del controllo sia per studi simulativi, ma anche per l'uso di questi modelli direttamente in campo (on-line) per il controllo predittivo (obiettivo c.);
- (iii) Elaborazione e sviluppo di modelli ridotti (obiettivo d.) a partire da data set surrogati integrati nel sistema di controllo che includono sia variabili termiche (Sezione 6.6) che fotometriche (Sezione 5). Questa attività ha permesso sul caso studio edificio F40, presso Enea Casaccia, di studiare l'efficacia nell'implementare possibili modelli ridotti di luce naturale per realizzare un controllo predittivo delle veneziane, mentre sul caso studio TWINS, presso il Politecnico di Torino, di sviluppare modelli termici ridotti, analizzandone metodologia e requisiti, che permettessero di supportare un controllo predittivo (model predictive control) di vetri dinamici in campo. I due casi studio sui quali sono stati sviluppati i modelli ridotti e la strategia co-simulativa, hanno permesso di sviluppare delle metodologie e un know-how generalizzabile e scalabile su diversi contesti edilizi e climatici;

(iv) Analisi per mezzo di simulazioni numeriche della prestazione di strategie di controllo model-based (obiettivo e.) per la riduzione del fabbisogno energetico e per il miglioramento del comfort termico e visivo ambientale interno relativamente all'edificio F40 (Sezione 4). Quest'attività, partendo da modelli calibrati e validati, sia termici che di daylight, e da una strategia di co-simulazione che replicasse il livello di automazione presente ed il suo effetto sull'ambiente fisico, è stata particolarmente focalizzata sulla reale implementabilità di strategie di controllo in campo nell'edificio F40, considerando:

- il livello di automazione raggiungibile dall'involucro (sia in termini di attuazione, che di complessità dei controlli, RBC e MBC mono e multi-obiettivo) e la relativa integrazione con il sistema impiantistico;
- la possibilità di utilizzare il livello di informazioni di campo (field layer) presenti nell'edificio F40 (sensori nelle stanze e centralina climatica), come supporto decisionale per il controllo;
- la possibilità di migliorare questo livello di informazioni con sensori aggiuntivi (come sensori di CO<sub>2</sub>), come supporto decisionale per il controllo;
- la possibilità di migliorare questo livello di informazioni con modelli predittivi, come supporto decisionale per il controllo, riguardo a (i) condizioni esterne ed interne (ricambi d'aria in base alla velocità e direzione del vento, (ii) modelli fisici di daylight, (iii) modelli data-driven di daylight, (iv) modelli di comfort termico dell'occupante tradizionali ed innovativi, considerando l'effetto della radiazione solare diretta sull'occupante) e (v) modelli di comfort visivo.

I risultati dell'analisi simulativa (Sezione 4.5) mirano a sottolineare i benefici della metodologia utilizzata, e dei controlli elaborati, in termini di riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio F40 e dei carichi di picco (invernali ed estivi, nell'ipotesi di presenza di condizionamento estivo per gli ambienti analizzati), ed allo stesso tempo di miglioramento del comfort termico, visivo e di qualità dell'aria per gli occupanti dell'edificio;

(v) Implementazione reale di strategie di controllo avanzate del tipo model predictive control (obiettivo f.) per vetri dinamici nell'apparato sperimentale TWINS presso il Politecnico di Torino (Sezione 6). Quest'attività presenta due tipi di risultati, uno di processo ed uno di prodotto sul tipo di controllo migliore per una determinata tecnologia, a seconda del contesto nel quale si usa. Il secondo tipo di risultati è, tuttavia, poco generalizzabile, in quanto gli effetti del controllo e delle condizioni climatiche sulla test cell sperimentale, sono poco rappresentativi di un contesto edilizio reale (esposizione di tutte le pareti a temperatura esterna e radiazione solare, perdite di ventilazione per infiltrazioni alte, massa termica dell'involucro edilizio ridotta). Il processo utilizzato per implementare questi controlli ha, invece, permesso di:

- Individuare i parametri e le caratteristiche fondamentali di un modello ridotto termico mono-zona per il controllo predittivo di vetri dinamici, e ridurre i tempi e le risorse sperimentali per generare un dataset che permettesse di identificare tali modelli ridotti data-driven;
- Sviluppare, implementare e testare un'infrastruttura sperimentale (di acquisizione di dati e controllo dell'ambiente interno), co-simulativa e di automazione, che possa supportare il test di controlli avanzati per elementi di involucro dinamici;
- Sviluppare un gemello digitale (digital twin) del sistema sperimentale, con il massimo livello di maturità raggiungibile (descrittivo, informativo, predittivo, prescrittivo ed automatizzato o trasformativo), che possa supportare il test, lo sviluppo ed il commissioning di controlli avanzati per elementi di involucro dinamici, di sensori e di sistemi di controllo, nonché di tecnologie dinamiche di involucro.
- Sviluppare una maggiore sensibilità sull'identificazione del compromesso migliore tra complessità del controllo, l'accuratezza dei modelli di predizione, implementabilità e integrazione di questi per tecnologie dinamiche di involucro edilizio.

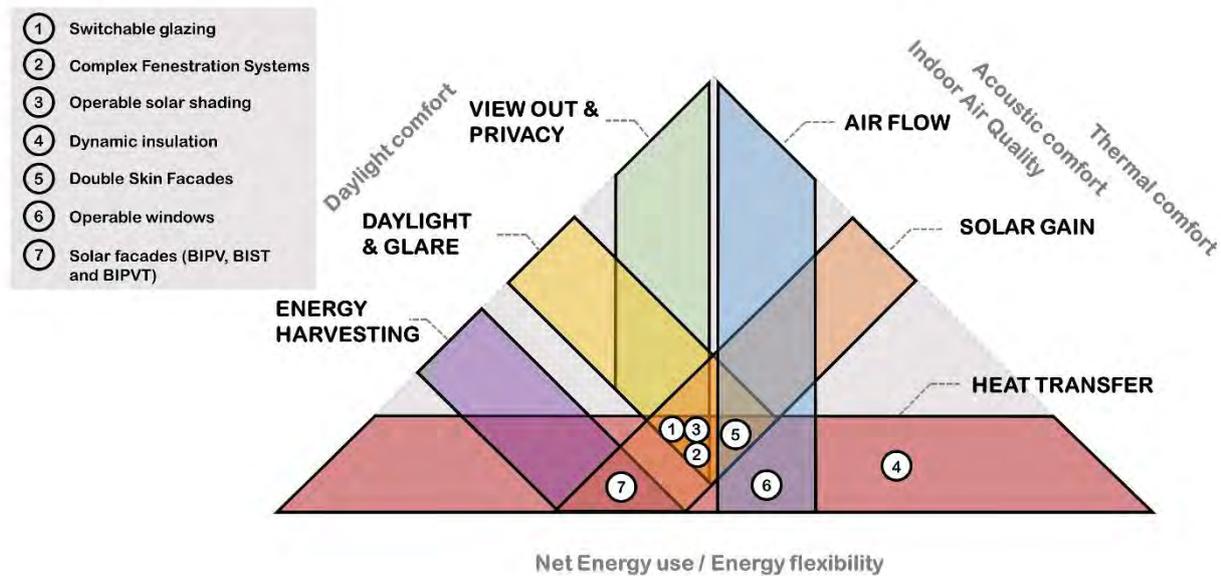
### 3 Analisi critica sulle tecniche di controllo per elementi di involucro trasparenti dinamici

#### 3.1 *Il fine dell'automazione in elementi di involucro dinamici*

In termini generali, il fine di un involucro edilizio che ha caratteristiche dinamiche è quello di raggiungere uno o più requisiti prestazionali in una maniera più efficiente di un edificio con un involucro "statico" convenzionale. Quando il focus di interesse è il risparmio energetico e la qualità ambientale, questo fine di alto livello può essere tradotto nei seguenti requisiti prestazionali:

- *Comfort visivo*: controllando la quantità e la direzionalità della radiazione solare nello spettro del visibile per garantire un livello adeguato di luce naturale, vista verso l'esterno ed altri fattori qualitativi della luce, evitando l'abbagliamento;
- *Comfort termico*: modulando l'irraggiamento solare (i.e. per evitare il surriscaldamento estivo, o per ammettere apporti solari gratuiti che bilancino le dispersioni e le asimmetrie radianti locali etc.) o controllando lo scambio di massa tra interno ed esterno mediante ventilazione naturale;
- *Qualità dell'aria*: controllando la quantità di aria esterna di rinnovo immessa nell'ambiente interno;
- *Comfort acustico*: controllando la trasmissione del rumore tra esterno ed interno (soprattutto dove si fa ricorso alla ventilazione naturale);
- *Riduzione dell'uso di energia per la climatizzazione degli edifici, ventilazione ed illuminazione*: controllando i guadagni solari gratuiti (per ridurre l'uso dell'illuminazione elettrica e la domanda di energia per il riscaldamento e per ridurre la domanda di energia di raffrescamento), gli apporti e le dispersioni di calore, e massimizzando il potenziale di produzione di energia da RES (Renewable Energy Sources) integrate in facciata.

Diverse tecnologie dinamiche di involucro possono essere integrate in un edificio per perseguire questi requisiti (o alcuni di essi). Queste tecnologie possono essere classificate in due categorie principali in base al loro meccanismo di controllo, i.e. intrinseco o estrinseco [9]. Un controllo intrinseco (o passivo) implica che l'adattività delle proprietà dell'involucro sia controllata direttamente da uno stimolo esterno (i.e. temperatura, radiazione solare etc.), come conseguenza di una variazione dell'energia interna del materiale stesso. Appartengono a questa categoria tecnologie termocromiche, fotocromiche, materiali a cambiamento di fase (PCM), alcuni tipi di tecnologie cinetiche di facciata basate su SMA (Shape Memory Alloys), etc. Per queste non c'è bisogno di alcun intervento esterno (sistema di controllo / utente) e quindi di un meccanismo decisionale "intelligente" (o sistema di calcolo) che supporti il controllo. A differenza, estrinseco (o attivo) si riferisce alla necessità di un sistema decisionale esterno che forzi un'azione nel sistema di involucro dinamico, attraverso un algoritmo che acquisisca un segnale da un sensore, processi questa informazione e determini un certo output di controllo. Di questa categoria fanno parte tecnologie come vetri elettrocromici, schermature solari mobili, facciate cinetiche. Questo sistema "intelligente" di involucro, necessita di un controllo attivo e di un processo decisionale che faccia uso di sensori, calcolatori (con algoritmi pre-impostati) e attuatori. La Figura 1 rappresenta uno schema non-esaustivo delle interconnessioni tra le diverse tecnologie dinamiche di involucro estrinseche (o attive) indicate con numeri, i domini e fenomeni fisici che influenzano e le variabili che possono essere controllate indicate con i colori, e gli obiettivi di performance (testo grigio nella parte più esterna della figura). Questa rappresentazione vuole dare un'idea di come dei sistemi così interconnessi necessitino di un certo livello di intelligenza per gestire requisiti contrastanti, tra domini fisici complementari. Questo concetto sarà esemplificato nei prossimi paragrafi.



**Figura 1. Obiettivi di performance al fine del controllo di facciate dinamiche attive e relative tecnologie [7]: i colori rappresentano i meccanismi di scambio dell'energia, i numeri rappresentano alcune tecnologie di involucro dinamiche.**

Ad esempio, le tecnologie cromogeniche attive (strati elettrocromici, dispositivi a particelle sospese, dispositivi a cristalli liquidi, ecc.) e le schermature solari dinamiche (i.e. tende veneziane, tende a rullo, ecc.) possono modulare attivamente la quantità di radiazione solare che entra nell'ambiente interno. A seconda della tecnologia utilizzata, la trasparenza (e quindi la radiazione solare in entrata) può essere modulata per riflessione (speculare o in direzioni diverse) e/o assorbimento. Questi diversi meccanismi possono essere utilizzati per diverse funzioni quali: fornire privacy o vista verso l'esterno; ridurre momentaneamente il rischio di abbagliamento mantenendo un livello sufficiente di luce diurna; ridurre la quantità di radiazione solare che entra in estate per evitare il surriscaldamento, massimizzando al contempo i guadagni solari gratuiti in inverno. Tuttavia, a seconda delle condizioni specifiche locali (come il clima e la latitudine, l'esposizione della facciata, la disposizione dell'ambiente interno, ecc.), tali requisiti possono essere temporaneamente contrastanti ed è necessario talvolta stabilire compromessi o priorità nel controllo automatizzato di tali sistemi. Esempi tipici di tali obiettivi contrastanti sono proteggere dall'abbagliamento ed avere sufficiente luce diurna e guadagni solari gratuiti durante l'inverno, oppure evitare il surriscaldamento estivo ed avere un livello sufficiente di luce naturale [10].

L'apertura automatizzata delle finestre ha un impatto immediato sul fabbisogno energetico dell'edificio, sul comfort termico e sulla IAQ. L'obiettivo di tale automazione è comunemente la qualità dell'aria ed il controllo del surriscaldamento estivo e nella mezza stagione [11], sfruttando la ventilazione naturale come tecnica di raffrescamento passivo[12]. Negli edifici residenziali con condizionamento estivo, a seconda della strategia di controllo adottata, l'apertura delle finestre potrebbe ridurre il fabbisogno annuo di energia di raffrescamento tra il 58 e l'86%[13]. Tuttavia, i requisiti di ventilazione naturale potrebbero essere, in alcune circostanze, in conflitto con la necessità di riscaldare un edificio, o di smorzare il rumore generato dall'esterno [14].

Le facciate a doppia pelle (DSF) sono sistemi di finestratura complessi in grado di controllare attivamente sia la ventilazione tra esterno ed interno (e viceversa), che i guadagni solari e la luce naturale, per soddisfare diversi obiettivi prestazionali. Ciò si ottiene controllando il tipo ed il percorso della ventilazione nell'intercapedine della facciata a doppia pelle (mediante aperture automatizzate, e con sistemi di schermature solari mobili). Le DSF possono soddisfare molteplici requisiti prestazionali all'interno dello stesso elemento, combinando e migliorando le caratteristiche delle due tecnologie separate sopra menzionate, ma ciò avviene al costo di una maggiore complessità di automazione. Esistono anche alcuni esempi in cui tecnologie per la produzione di energia solare sono integrate nella cavità[15], aggiungendo un

ulteriore livello di complessità nel processo decisionale, che richiede quindi considerazioni sulla conversione dell'energia solare, l'energia termica per la climatizzazione, la luce naturale, l'abbigliamento, ecc.

Queste tecnologie, potendo rispondere a requisiti prestazionali diversi e talvolta contrastanti, necessitano dell'impiego di un sistema di automazione e controllo "intelligente" che possa capire e prioritizzare un obiettivo rispetto ad un altro. Per determinare la capacità di questi sistemi dinamici di facciata di soddisfare gli obiettivi prestazionali dell'edificio, devono essere considerate le caratteristiche dinamiche relative a tale automazione, quali:

- la dinamicità delle condizioni climatiche esterne ed interne (ovvero variazione della temperatura esterna, variazione della geometria solare e dell'intensità della radiazione solare, variazione della concentrazione di inquinanti nell'aria esterna, variazione del livello di rumore esterno, variazione dell'occupazione e dei requisiti degli occupanti, ecc.);
- la dinamicità dei fenomeni fisici e fisiologici coinvolti, che possono essere caratterizzati da costanti di tempo variabili da millisecondi, a pochi secondi, a poche ore (es. percezione di suoni acuti e vibrazioni, percezione di illuminamento e variazione di luminanza, variazione del metabolismo umano come reazione all'ambiente termico, flusso di massa all'interno di una stanza, accumulo di calore per radiazione solare nella massa termica dell'edificio, ecc.);
- la responsività del sistema di facciata stesso, che è la capacità di reagire ai e di agire sui fenomeni fisici e sul loro dominio di variazione (questa è funzione del numero di possibili configurazioni di facciata, quindi delle possibili azioni di controllo, del tempo necessario per l'attuazione e per il processo decisionale relativo al processo di automazione).

### 3.2 *Requisiti e sfide dell'automazione di involucri dinamici*

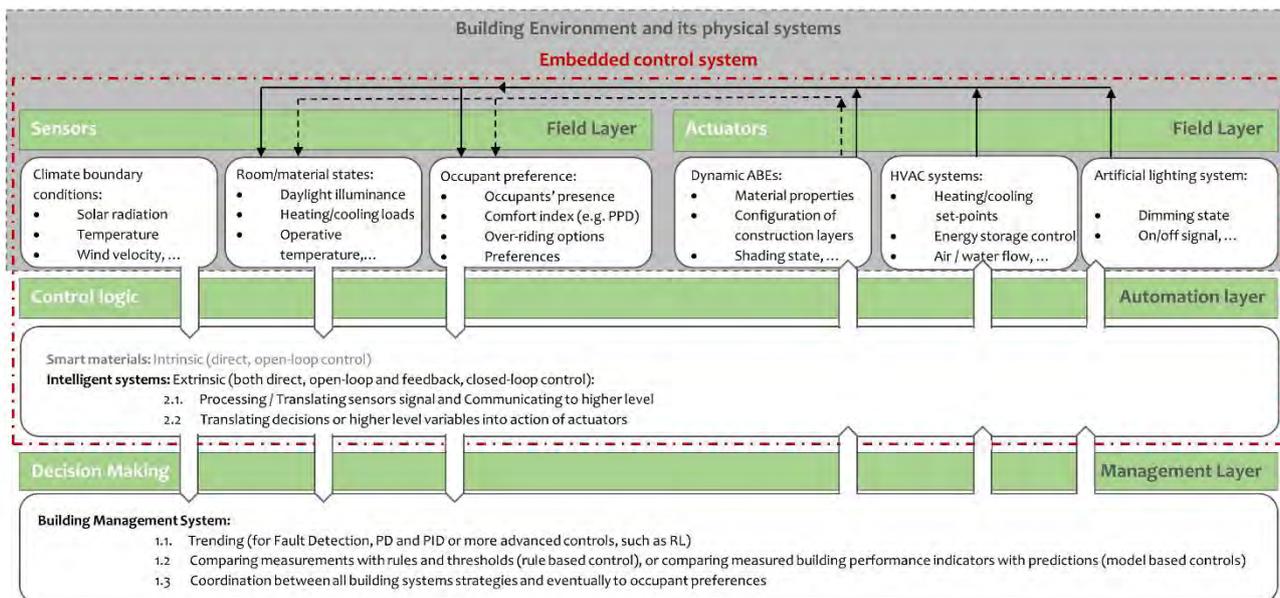
Il controllo dei sistemi di involucro dinamico, soprattutto rispetto ad altri sistemi edilizi, richiede la conoscenza di come più domini fisici interagiscano tra loro. Allo stesso tempo, l'interazione tra la facciata e gli altri componenti/sistemi dell'edificio può essere in alcuni casi minima, o ottenuta con funzioni gerarchiche di facile determinazione (ad es. l'illuminazione diurna può essere facilmente preferita all'illuminazione artificiale), mentre in altri l'interazione tra la facciata e l'ambiente interno devono essere parte del processo decisionale (i.e. considerare le caratteristiche inerziali dell'edificio in relazione al controllo del guadagno solare). Tale presenza di interazione con l'ambiente interno (e la necessità di considerarlo nel processo decisionale), si riflette nella necessità di differenziare tra logiche di controllo "a circuito aperto" e "a circuito chiuso". Se l'azione di controllo non influisce sul segnale di ingresso del sensore per il controllo stesso, si parla di sistema di controllo "open-loop" (come ad esempio il controllo di una schermatura solare in base alla geometria solare). Al contrario, quando il segnale del sensore in ingresso dipende dall'azione di controllo stessa, questo è indicato come un sistema di "feedback" o un controllo "closed-loop" (come ad esempio il controllo di una schermatura solare in base alla temperatura dell'aria interna misurata nella stanza). I controlli closed-loop hanno il vantaggio di misurare l'impatto su un determinato obiettivo di prestazione in modo più diretto, poiché l'output desiderato (i.e. temperatura dell'aria interna da raggiungere) può essere confrontato direttamente con quello effettivo, e possono quindi assicurare un raggiungimento dell'obiettivo prestabilito (i.e. comfort più alto o riduzione del fabbisogno energetico), ma hanno lo svantaggio di avere un'implementazione molto più complessa.

La combinazione tra la natura multifisica dei problemi di controllo delle facciate, con i requisiti in termini di frequenza e tipo di feedback, richiede la considerazione di algoritmi di controllo complessi che includono controlli sia open- che closed-loop. Ad esempio, quando si considera il controllo dell'apporto solare gratuito in relazione al bilancio energetico della zona di un edificio, devono essere prese in considerazione le caratteristiche inerziali della zona dell'edificio che si sta controllando, per definire quanto in anticipo devo ridurre o aumentare la quantità di radiazione solare ammessa nella zona termica per minimizzare l'energia per il raffrescamento o riscaldamento. Per questo tipo di controllo è necessario un controllo closed-loop, ma la frequenza del controllo può essere relativamente inferiore rispetto ad altri domini (da una a poche ore), a seconda della tecnologia specifica, dell'ora del giorno (ciclo giorno/notte) e caratteristiche costruttive della

zona termica ([10], [16]). Al contrario, quando l'obiettivo del controllo è il comfort visivo, è necessaria una maggiore frequenza (nell'ordine di pochi minuti, o meno) per implementare una soluzione efficace che ad esempio riduca il fabbisogno di energia per l'illuminazione o che riduca l'abbagliamento (ad esempio basata sulla geometria solare e la quantità di radiazione solare incidente). Questo esempio introduce la necessità di un bilanciamento tra un controllo reattivo e uno predittivo; infatti, alcuni aspetti legati al comfort visivo ed acustico, possono essere adeguatamente affrontati attraverso un'azione di controllo reattiva. Al contrario, altri aspetti legati all'uso dell'energia, alla conversione ottimale dell'energia solare e alla ventilazione, per citarne alcuni, se affrontati con un approccio predittivo, potrebbero avere un impatto complessivo molto maggiore sulla performance dell'edificio. Per cui, a seconda dell'obiettivo (energia o comfort), è possibile adottare un tipo di controllo open- o closed-loop, predittivo o reattivo. L'illuminazione diurna e il rumore sono buoni esempi di aree di controllo della facciata che spesso possono essere basate su feedback open-loop (che sono più semplici da eseguire, rendendo così la sequenza di controllo meno impegnativa), ma richiedono una frequenza di controllo molto alta (nell'ordine di pochi secondi) in quanto legati a fenomeni fisici più veloci (rispetto al trasferimento di calore negli edifici).

Un controllo continuo nell'intervallo di secondi può essere però difficile da accettare per l'utente. Un cambiamento molto frequente di uno stato di facciata percepibile dagli utenti (ad esempio il grado di trasparenza di un vetro o la posizione di un dispositivo oscurante) può infatti interrompere le loro attività (e persino diventare controproducente). La necessità di integrare l'occupante dell'edificio nella sequenza di feedback del controllo (user-in-the-loop) per garantire un controllo automatizzato orientato all'utente è un argomento completamente nuovo nel campo del controllo di sistemi di involucro. Infatti, tutte le sfide, menzionate ed esemplificate sopra, devono essere affrontate considerando l'interfaccia con gli occupanti, oltre che con tutti gli altri sistemi dell'edificio (i.e. condizionamento, ventilazione ed illuminazione). L'automazione degli edifici (controllo automatizzato di un edificio e la sua interfaccia con gli occupanti) viene convenzionalmente eseguita attraverso una struttura gerarchica a tre livelli [17]: un field-layer (campo), un automation-layer ed un management-layer (Figura 2). Il field-layer è costituito da sensori e attuatori, alcuni dei quali sono anche programmati per interagire con gli utenti dell'edificio. I dispositivi in questo layer sono collegati alle unità di controllo del livello superiore tramite collegamenti diretti o protocolli "bus". Il livello di automazione è costituito da unità di controllo che coordinano le misurazioni ed informazioni provenienti dal livello inferiore (field), eseguono cicli di controllo e raccolgono dati storici a breve termine. Il livello più alto della gerarchia (management), è responsabile della gestione complessiva del sistema attraverso un approccio centralizzato dall'alto verso il basso.

In questa struttura, gli elementi dinamici nelle facciate sono spesso visti come gli attuatori nell'architettura di controllo, nel livello più basso (field). La lettura delle variabili rilevanti ai fini del controllo (i.e. temperatura, radiazione solare, occupazione etc.) è solitamente centralizzata (con poche centraline che acquisiscono pochi dati da un numero limitato di sensori), mentre il processo decisionale che porta ad un segnale di comando agli attuatori posti negli elementi di facciata (ad esempio un driver elettrico per azionare un dispositivo di oscuramento, o un driver a catena per aprire una finestra) avviene solitamente nei livelli inferiori (field e/o automation-layer). Questo approccio è economico e, in una certa misura, funzionale quando il grado di complessità dell'automazione è basso, ovvero dove l'attuazione è limitata a pochi elementi o lo stesso segnale di comando viene inviato ad un numero elevato di attuatori (ad esempio il comando di un dispositivo di schermatura è unico per un'intera facciata). Tuttavia, quando il numero di unità (sistemi di involucro) che richiedono un funzionamento automatizzato ottimale aumenta, o quando il tipo di controllo deve essere differenziato per soddisfare una serie di requisiti di prestazioni locali, in particolare su più domini (es. comfort termico e visivo), si rende necessario aggiornare l'approccio della catena di controllo e di avvicinare il processo decisionale alla facciata, attraverso l'integrazione di elementi dell'automazione e del livello gestionale all'interno del sistema di facciata.



**Figura 2. Architettura di un sistema di controllo per edificio, che include elementi dinamici di involucro e sistemi per il controllo ambientale (le linee continue rappresentano feedback closed-loop, mentre le linee tratteggiate rappresentano materiali dinamici passivi e quindi feedback open-loop) [7].**

Questa intelligenza locale consente una serie di caratteristiche avanzate del controllo che sono di fondamentale rilevanza per garantire una gestione efficace di un involucro dinamico, come di seguito elencati:

- **Performance-oriented** (orientato al raggiungimento di un obiettivo prestazionale): lo scopo dell'automazione dell'involucro dell'edificio deve rispondere chiaramente a uno o più obiettivi prestazionali in modo che la progettazione e il funzionamento di tale automazione contribuiscano positivamente al miglioramento degli aspetti specifici delle prestazioni dell'edificio (cioè diminuzione del fabbisogno energetico, aumento della quota di produzione di energia da RES in loco, miglioramento del comfort termico e/o visivo degli occupanti, ecc.), utilizzando informazioni di input che corrispondono alle condizioni specifiche vicino alla facciata (invece che le condizioni al contorno generali misurate a livello dell'edificio);
- **Integrato**, anche se fisicamente separato, con l'automazione di altri sistemi dell'edificio: il coordinamento con l'automazione di altri sistemi dell'edificio (come HVAC ed illuminazione) farà sì che l'obiettivo di prestazione sia raggiunto sinergicamente con il minimo sforzo possibile (in termini di costi relativi a energia, manutenzione, impatto sull'occupante dell'edificio, ecc.);
- **Interfacciato** con l'occupante dell'edificio: l'automazione dell'involucro, se prevede con successo il comportamento degli occupanti e ne consente l'interazione può combinare efficacemente i requisiti di prestazione energetica dell'edificio con le preferenze degli occupanti stessi, al fine di raggiungere requisiti di comfort con una spesa minima, riducendo il rischio di disturbare l'occupante e di costringerlo ad un intervento manuale (over-ride) che potrebbe ostacolare l'efficacia della strategia di controllo verso il raggiungimento dell'obiettivo prestazionale prestabilito [18].

### 3.3 Elementi, caratteristiche e logiche per integrare l'automazione in involucri dinamici

Quando un sistema di facciata adattivo viene adottato sistematicamente sull'intera facciata di un edificio, avvicinare la raccolta delle informazioni e il processo decisionale all'elemento che è coinvolto in questa catena di controllo (l'involucro) risulta quindi essere una soluzione ideale per soddisfare i requisiti descritti sopra, in particolare quando questo presuppone una misurazione locale degli indicatori di prestazione, con una discretizzazione temporale e spaziale sufficiente per il dominio specifico di interesse (ad

esempio per il comfort visivo, termico, etc.). In questo modo si può riuscire a coordinare i requisiti locali e temporanei con quelli a lungo termine a livello di edificio, e a includere veramente l'occupante nel processo di controllo. Questa visione è supportata anche dal trend di sviluppo di molte altre infrastrutture ICT e IoT. Guardando altri sistemi di costruzione, è possibile vedere un numero crescente di dispositivi intelligenti, come termostati, valvole e pompe, che sono ora disponibili con intelligenza locale incorporata. Questi dispositivi mostrano la capacità di comunicare direttamente tra loro e con i sistemi di supervisione (BMS, Building Management Systems) per aumentare le possibilità di controllo e raggiungere prestazioni coordinate e ottimali.

L'integrazione di diversi elementi che possono comporre un sistema embedded è già una realtà nel mercato di diversi attuatori, ad esempio driver elettrici per la movimentazione di schermature solari o cosiddetti driver a catena per l'apertura meccanica di finestre. In molti casi, questi sistemi includono sensori di base, semplici microprocessori che controllano le variabili di processo all'interno dell'attuatore (ad esempio la velocità del motore, la funzione di avvio/arresto) e porte di comunicazione che consentono di collegare l'attuatore all'automation layer dell'architettura di automazione di edifici convenzionali. Tuttavia, ciò che rende questi elementi locali lontani dall'essere intelligenti è la mancanza di una strategia incorporata per controllare i componenti di involucro - in altre parole mancano del open- o closed-loop che automatizza l'azione (in sinergia con gli altri sistemi dell'edificio). Per attivare la sequenza di feedback (intelligente) di un sistema di controllo completamente integrato, e quindi controllare autonomamente un involucro edilizio dinamico, è necessario fornire all'agente intelligente locale informazioni adeguate sulle condizioni ambientali intorno alla facciata (le condizioni al contorno) e il livello di prestazione desiderato da raggiungere. A causa della complessità e del costo della misurazione delle prestazioni effettive dell'edificio (ad es. comfort degli occupanti, fabbisogno energetico dell'edificio), la misurazione delle grandezze fisiche nell'ambiente interno può essere utilizzata come proxy per la loro previsione (ad es. la temperatura dell'aria per il comfort termico o per il fabbisogno energetico, o illuminamento a livello della scrivania per l'abbagliamento ecc.). Tuttavia, questo può essere influenzato da grandi imprecisioni che possono derivare da:

- differenze tra condizioni locali di misurazione e comportamento globale dell'ambiente;
- dipendenza non lineare tra variabili controllate (es. radiazione solare in ingresso, portata massica dell'aria, pressione sonora, concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria esterna, luminanza di una superficie, solo per citarne alcune) e parametri di performance (temperatura dell'aria, comfort termico, comfort visivo, rischio di abbagliamento, IAQ, fabbisogno energetico dell'edificio), e la loro dipendenza da condizioni al contorno altamente dinamiche (ad es. condizioni climatiche, occupazione, carichi endogeni);
- sfasamento temporale tra azione di controllo e relativo feedback sulla variabile ambientale misurata.

Per questi motivi, i modelli sono sempre più utilizzati nella building automation per ridurre le imprecisioni di previsione, sia a livello di misurazione, che di logica di controllo e di supporto alla decisione.

Il processo decisionale all'interno del management layer per gli involucri edilizi dinamici, può quindi essere distinto tra operazioni manuali, manuali motorizzate e operazioni automatizzate. All'interno di quest'ultima categoria sono previsti diversi livelli di complessità decisionale (Tabella 1), replicando le due classi superiori di building automation della ISO 16484-1:2010 (classi A e B): i) "controllo basato su regole" (RBC, Rule Based Control, semplice ed integrato); ii) "controlli basati su modelli" (MBC, Model Based Control). Questa classificazione è stata adottata nella recente ISO 52016:3 "Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti – Parte 3: Procedure di calcolo relative agli elementi adattivi dell'involucro edilizio" (in fase di sviluppo durante la stesura di questo report, alla quale questa ricerca ha contribuito).

**Tabella 1. Tipi di controlli per facciate dinamiche in base alla complessità del layer di gestione [19]**

Field Level / Actuation	Management Layer / Control type		Characteristics
<b>Environmentally activated building components</b> (i.e. smart glazing such as thermochromics)	<b>1. Passive</b>		According to the boundary conditions
<b>Actively controllable building components</b> (i.e. electrochromic glazing, liquid crystal glazing, SPD, solar shading, double skin facades etc.)	<b>2. Manual</b>		Controlled by occupant with manual action on the actuator element
	<b>3. Manual motorised</b>		Controlled by occupant with remote electrical control
	<b>4. Automated</b>	4.1 Simple rule based	based on feedback from one physical quantity at the time (i.e. external solar radiation, or temperature, or internal temperature etc.)
		4.2 Integrated rule based	Based on decision tree of rules based on feedback from the combination of different sensors, with different priorities (i.e. occupancy, glare, daylight, energy)
4.3 Model Based control		Performance oriented control aimed at optimizing a certain performance objective, based on a model (physical, reduced order or black-box model)	

Le strategie RBC sono il processo decisionale di controllo più comune adottato nella pratica [20], sia nell'automazione complessiva degli edifici che nei primi esempi di sistemi embedded per sistemi di involucro dinamico. Queste strategie sono semplici e relativamente a basso costo (in termini di software e hardware) e consistono in un insieme di regole if-then basate sul confronto delle misurazioni dei sensori con soglie specifiche delle grandezze misurate. Gli RBC non sono in grado di prevedere l'effetto della decisione di controllo sulle prestazioni dell'edificio, perché si basano esclusivamente sulle informazioni relative allo stato attuale della facciata, alle condizioni al contorno e ai relativi parametri ambientali interni. Per questo motivo, la progettazione di un RBC è solitamente basata sull'euristica, vale a dire sulla conoscenza esperta delle dinamiche del sistema dell'involucro edilizio e di come queste potrebbero influenzare specifici parametri prestazionali dell'edificio [21].

I MBC, al contrario, utilizzano la previsione stessa dell'impatto dell'azione di controllo sull'ambiente interno per prendere decisioni riguardo all'automazione, con l'obiettivo di massimizzare una specifica prestazione (migliorando le prestazioni dei controlli closed-loop). Tuttavia, questo avviene a scapito di una maggiore complessità in quanto, oltre ai requisiti generali già presentati, i MBC si affidano a caratteristiche aggiuntive a supporto del sistema decisionale di controllo:

- **accuratezza** - i modelli edilizi devono fornire informazioni accurate sui parametri prestazionali dell'edificio che si vuole massimizzare, questo richiede un certo livello di calibrazione mediante informazioni disponibili localmente; inoltre, può essere necessaria una certa discretizzazione spaziale delle informazioni, per implementare controlli affidabili. Ciò sottolinea, da un lato, la necessità di distribuire il rilevamento e l'elaborazione dei dati e, dall'altro, la capacità di misurare e prevedere con precisione le condizioni al contorno con un certo livello di discretizzazione temporale e spaziale (ad es. misurazioni complesse del cielo e previsioni meteorologiche, misurazione e previsione dell'occupazione e dei carichi endogeni);
- **velocità**: tali informazioni devono essere disponibili in un arco di tempo compatibile con le dinamiche di attuazione di una particolare tecnologia di involucro dinamico, nei domini che l'attuazione mira ad influenzare (come ad esempio pochi secondi per quanto riguarda il controllo dell'abbagliamento/luce

diurna, e nell'ordine delle ore per quanto riguarda i fenomeni di scambio termico). Ciò evidenzia la necessità di calcoli e previsioni veloci, in quanto un certo ritardo temporale può influire sull'efficacia del controllo.

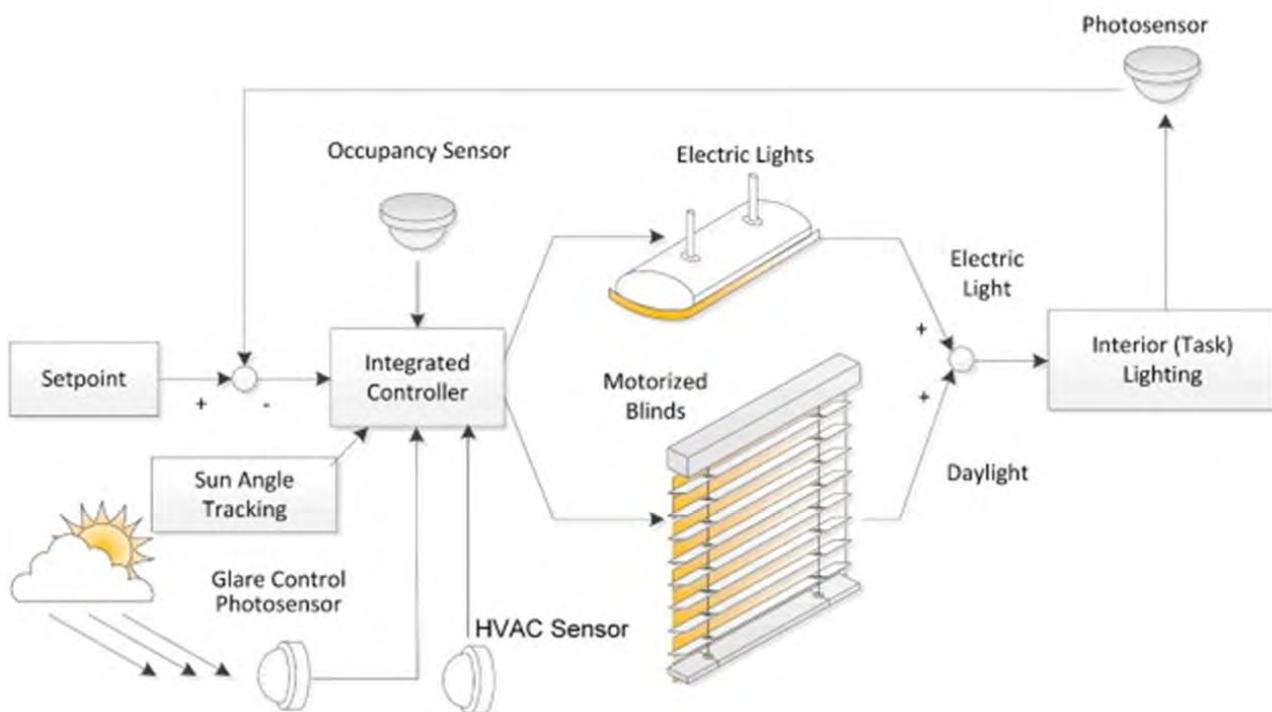
Tali requisiti aggiuntivi, rispetto a controlli non basati su modelli, comportano costi e sforzi significativi nella progettazione e implementazione delle strategie MBC negli edifici e ne possono ostacolare l'efficacia, in termini di rapporto costi benefici. L'intelligenza locale nelle facciate adattive può trarre vantaggio sia da RBC che da MBC e dalle loro combinazioni. Pertanto, non è possibile identificare in termini assoluti se l'una o l'altra logica sia la scelta migliore, ma nell'ottica di un sistema di automazione integrato e sinergico diverse logiche possono essere utilizzate per diversi livelli [22]. Ad esempio in una architettura di controllo in cui vi è un BMS centralizzato nel quale la facciata adattiva è un nodo distribuito di intelligenza, funzioni decisionali di alto livello (quelle solitamente associate al management layer, come il calcolo dei carichi solari in ingresso ottimali e le configurazioni dell'HVAC per zona termica) dovrebbero probabilmente essere effettuate dal BMS centrale, mentre i controllori decentralizzati (di basso livello, sulla facciata) possono determinare la configurazione ottimale degli attuatori locali, con maggiore precisione e minor tempo di calcolo, utilizzando RBC o MBC, (come ad esempio calcolare la specifica configurazione locale della facciata in grado di fornire un certa quantità di irraggiamento solare in ingresso, senza ridurre il comfort visivo e/o termico degli occupanti in prossimità della facciata).

Utilizzando i tre casi già menzionati in questa sezione ((i) controllo della radiazione solare attraverso vetri cromogenici e schermature solari; (ii) controllo della ventilazione naturale attraverso l'apertura automatizzata di finestre; (iii) controllo di radiazione solare e ventilazione tramite facciate a doppia pelle), dimostreremo nelle sezioni successive, attraverso una combinazione di revisione della letteratura ed esperienze pregresse degli autori maturate tramite specifici progetti di ricerca, come il controllo di tali sistemi viene attualmente eseguito utilizzando RBC e MBC, e come i controlli MBC si stiano evolvendo nell'attuale panorama di ricerca, sviluppo e innovazione, spostandosi verso l'integrazione dell'intelligenza direttamente a livello di facciata.

### *3.4 Controlli avanzati per elementi di involucro trasparente*

#### **3.4.1 Smart glazing e schermature solari**

Il controllo dei dispositivi di schermatura solare e di vetri dinamici, in combinazione con l'illuminazione artificiale, è un esempio di automazione delle facciate che ha raggiunto un certo livello di maturità tecnologica, che ne consente l'integrazione con gli attuali sistemi di automazione degli edifici, con schemi relativamente consolidati (come ad esempio in Figura 3). Le prestazioni in campo di schermature solari e vetri dinamici sono fortemente influenzate dalla strategia di controllo adottata[10]. L'influenza della strategia di controllo sulle prestazioni di queste tecnologie è stata affrontata da diversi studi, che hanno evidenziato la sensibilità, sia dei livelli di comfort indoor che del fabbisogno energetico dell'edificio, non solo alla variazione delle proprietà delle tecnologie cromogeniche [23] [24] [25] e dei dispositivi di schermatura[26], ma anche alle loro impostazioni di controllo[27]. In [28] si è stimata una deviazione del fabbisogno energetico del 24% per il riscaldamento invernale, del 39% per il raffrescamento estivo a causa delle diverse strategie di controllo dei dispositivi di ombreggiamento (basati sul livello di luce diurna all'esterno, temporizzati, o controllati con logica fuzzy). Per quanto riguarda le preferenze degli occupanti riguardo al controllo attivo della radiazione solare, la maggior parte degli studi mostra che gli occupanti tendono ad azionare queste tecnologie per evitare l'abbagliamento [29] [30] [31], suggerendo che nella progettazione di una logica di controllo per componenti di involucro dinamico, la protezione dall'abbagliamento dovrebbe essere prioritaria rispetto ad altri aspetti, come il comfort termico, le prestazioni energetiche e la vista verso l'esterno. Nella zona perimetrale dell'edificio, è stato dimostrato come la radiazione solare in ingresso possa avere un impatto significativo sul comfort termico degli occupanti[32], ed è quindi fondamentale considerarne il contributo sul bilancio termico del corpo umano e come questo impatti sul controllo della radiazione solare.



**Figura 3. Schema illustrativo degli elementi del sistema di controllo e attuazione per una schermatura solare dinamica (Figura originale in [33]).**

I controlli basati su regole ed alberi decisionali (RBC) sono attualmente i più diffusi per la gestione della radiazione solare in ingresso negli edifici[34]. I parametri più comuni utilizzati nelle strategie RBC sono: (i) la geometria solare[30] [35]; (ii) l'illuminamento orizzontale o verticale esterno[36] [37]; (iii) l'irraggiamento esterno orizzontale o verticale[23] [38]; (iv) l'illuminamento del piano di lavoro [24] [39]; (v) la presenza ed il numero di occupanti [40][41]; (vi) la temperatura dell'aria interna[42]; (vii) la presenza di carichi di riscaldamento o raffreddamento [43][44]. Lo standard dell'industria per il controllo dei vetri dinamici e di dispositivi di ombreggiamento combina questi parametri in strategie RBC strutturate ad albero, definendo le priorità tra abbagliamento, luce diurna e aspetti di fabbisogno energetico utilizzando sensori diversi come proxy per tali aspetti (ad esempio geometria e intensità della radiazione solare, copertura nuvolosa, temperature interne ed esterne, ecc.), come mostrato nella Figura 4.

Modelli numerici semplificati possono essere adottati per informare un RBC nel valutare parametri complessi, per i quali una misurazione diretta non è possibile al di fuori di un ambiente di laboratorio (ad esempio metriche di abbagliamento, temperature operative, velocità dell'aria). Questo approccio si basa su modelli derivati da misurazioni di alcune grandezze ambientali che sono statisticamente correlate alle grandezze non direttamente misurabili in una reale implementazione. Questa strategia prende il nome di model-enhanced RBC [26] [45]e rappresenta una logica di controllo più avanzata di un semplice RBC. Per tenere conto dell'effetto ritardato della radiazione solare sulle temperature interne degli edifici sono state elaborate anche logiche fuzzy e PID (proporzionale-integrale-derivato), e controlli basati sulle condizioni ambientali e sulle preferenze degli occupanti [28][46]. Infine, per tenere conto correttamente dell'effetto combinato della modulazione della radiazione solare, delle condizioni al contorno climatiche, della presenza degli occupanti, e per ottimizzare il fabbisogno energetico dell'edificio e/o i profili di temperatura interna, diversi ricercatori hanno esplorato le potenzialità dell'adozione di controlli Model-Predictive (MPC) [10] [47] [48] [49][50]. Secondo gli autori in [10], strategie MPC potrebbero produrre una significativa riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio rispetto a strategie RBC, per condizioni in cui la modulazione della radiazione solare può bilanciare le perdite/apporti di calore attraverso l'involucro dell'edificio. Infatti, nei climi temperati e nelle stagioni intermedie la performance dell'MPC rispetto a strategie euristiche sono nell'intervallo del 20-50%, come confermato dallo studio di [51], mentre in condizioni climatiche più estreme, in cui i fabbisogni energetici sono però maggiori, questa differenza può ridursi in modo significativo. Per

quanto riguarda la modulazione della radiazione solare, le strategie RBC possono essere potenziate ed informate da MPC fatta fuori linea (non in campo in tempo reale), imitando una MPC con una bassa diminuzione delle prestazioni in campo [52]. Ad esempio in [53] gli autori hanno testato la possibilità di replicare un controllo MPC di un vetro elettrocromico, attraverso l'estrazione di regole da un set di dati di simulazione con controllo MPC, ben allenato.

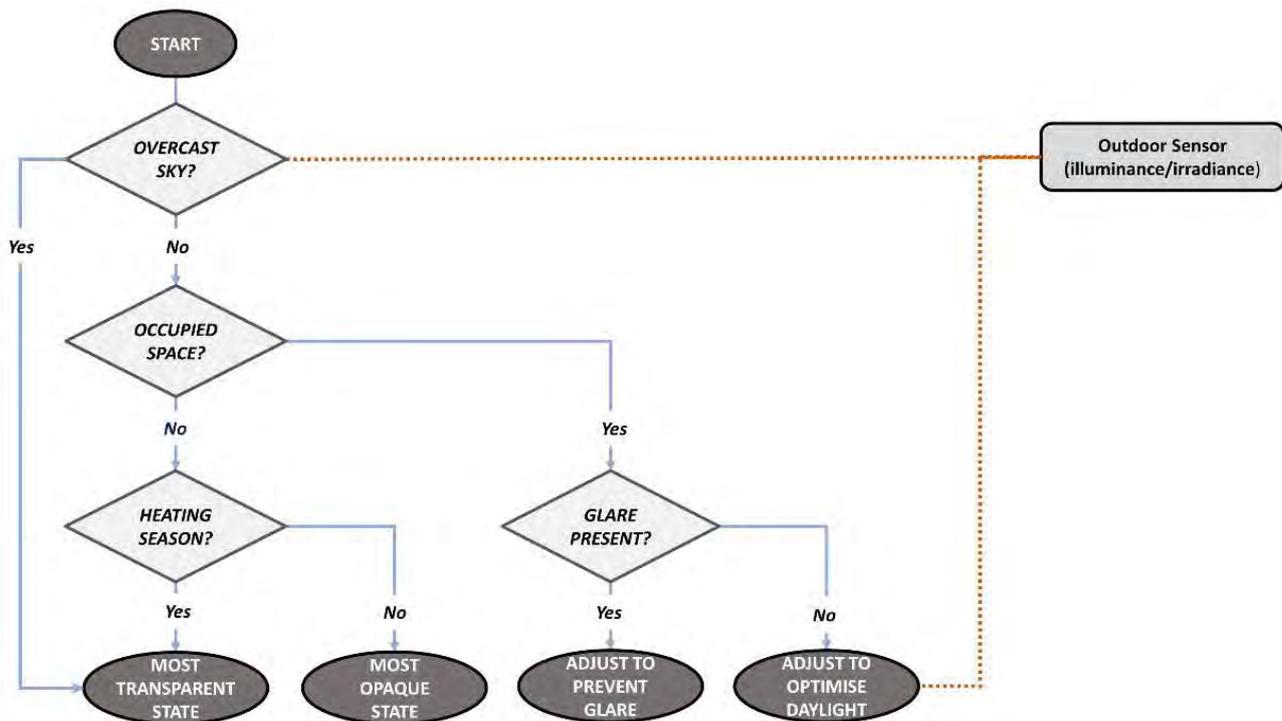


Figura 4. Schema illustrativo di un tipico controllo rule-based euristico per vetri dinamici attivi [19].

### 3.4.2 Apertura automatizzata delle finestre

L'apertura delle finestre è delegata all'azione diretta degli occupanti nella maggior parte degli edifici. Tuttavia, nell'ultimo decennio molti studi si sono concentrati sul tema dell'automazione dell'apertura delle finestre e sul suo impatto sulle prestazioni (contrastanti) di comfort termico invernale ed estivo, riduzione del fabbisogno energetico, IAQ e comfort acustico.

La maggior parte degli studi si concentra sullo sviluppo e/o valutazione di strategie RBC per automatizzare la ventilazione naturale allo scopo di ridurre l'uso di energia per il raffrescamento degli edifici (senza aumentare l'energia per il riscaldamento), come in [13], o rischio di surriscaldamento estivo [12]. Solitamente, per tali fini, ci si avvale di semplici regole basate sulla differenza di temperatura interna ed esterna come proxy del fabbisogno energetico, e adottando la temperatura dell'aria interna come proxy del comfort termico globale. Altri studi, come [54], [55] e [56] hanno adottato invece dei modelli di comfort globale (basato su PMV oppure su temperatura operativa per il comfort adattivo) per elaborare e implementare strategie RBC. In [55] gli autori dimostrano che il vantaggio di adottare un modello di comfort nel processo decisionale a supporto di un RBC per l'automazione della ventilazione naturale, può portare a una riduzione fino al 56% della percentuale di persone insoddisfatte per l'ambiente termico. In [56] un controllo RBC basato sul PMV, viene confrontato con un RBC basato invece sul comfort adattivo, per automatizzare l'apertura della finestra in un sistema di ventilazione ibrido, risultando in un aumento del 15-20% del tempo in cui viene raggiunta una condizione termica confortevole. Tuttavia, indicatori di comfort così complessi (PMV e/o temperature operative) sono molto sensibili a condizioni locali che vanno ben oltre la sola temperatura dell'aria (campo radiante, e per il PMV anche velocità dell'aria, umidità relativa, isolamento del vestiario, attività degli

occupanti), che non sono facili da misurare in modo continuo, in una possibile implementazione reale. In questi casi, l'uso di modelli per informare il processo decisionale di controllo è di grande importanza. Quando si parla di qualità dell'aria interna, la ventilazione naturale attraverso l'apertura delle finestre gioca un ruolo fondamentale nella riduzione della concentrazione di CO<sub>2</sub>, del particolato fine e delle sostanze inquinanti. Gli autori in [57] hanno dimostrato che il livello della concentrazione di CO<sub>2</sub> in un ambiente interno, è molto ben correlata all'apertura delle finestre da parte degli occupanti. Pertanto, l'automazione dell'apertura delle finestre basata su specifiche soglie di CO<sub>2</sub> è di particolare importanza per mantenere un livello adeguato di IAQ [58].

Il flusso di massa attraverso le aperture degli edifici è fortemente influenzato dalle incertezze climatiche (come variabilità del vento, impatto della radiazione solare sull'effetto camino, ecc.). Tale flusso incide sul bilancio termico e sulle temperature all'interno dell'edificio, ma questo effetto è particolarmente difficile da prevedere in presenza di fenomeni inerziali (per edifici con notevole massa termica). Inoltre, anche l'occupazione dell'edificio (che può, in alcuni casi, essere molto variabile) è un fattore centrale per stabilire requisiti di ventilazione naturale, per controllare la qualità dell'aria interna. La previsione dell'impatto di queste variabili sul bilancio termico e di massa dell'edificio, può quindi svolgere un ruolo significativo nel supportare le decisioni che influenzano l'automazione dell'apertura delle finestre, con l'obiettivo di bilanciare requisiti di efficienza energetica, comfort termico e qualità dell'aria. In particolare, in [59], l'adozione di un MPC ha permesso di ridurre il surriscaldamento estivo (quantità di ore con temperatura interna sopra i 25 °C) del 39%, 28% e 15%, per costruzioni a massa termica alta, media e bassa rispettivamente, comparato con un RBC. Gli autori in [60] hanno implementato un MPC per automatizzare l'apertura delle finestre di un edificio con mixed-mode ventilation, al fine di ottimizzare contemporaneamente il comfort termico e la qualità dell'aria interna. E' stato valutato il potenziale di un approccio MPC distribuito (in cui i controller locali ottimizzano le aperture delle finestre di tre diverse zone termiche) rispetto a un'architettura più classica con un MPC centralizzato. Entrambi gli approcci MPC sono stati in grado di ridurre al minimo il discomfort termico e la concentrazione di CO<sub>2</sub>, ma mentre il controller MPC centralizzato ha ridotto il fabbisogno di energia per il riscaldamento del 30%, quello distribuito lo ha ridotto del 24%, ma con un quarto dello sforzo computazionale. Ciò dimostra la compatibilità dell'MPC anche con l'utilizzo di controllori decentralizzati, come è stato in seguito dimostrato dagli autori in [61], che hanno implementato un approccio MPC attraverso un microcontroller single-board integrato, dedito alle funzioni di field e automation layer. Considerato quanto l'apertura delle finestre rimanga un comportamento strettamente legato alla sensibilità degli occupanti [62], sono emerse sempre più applicazioni che utilizzano modelli di machine learning per prevedere il comportamento di apertura delle finestre degli occupanti[63], e utilizzare tali modelli in sinergia con l'automazione.



Figura 5. Meccanismi diversi di automazione dell'apertura di finestre differenti [64].

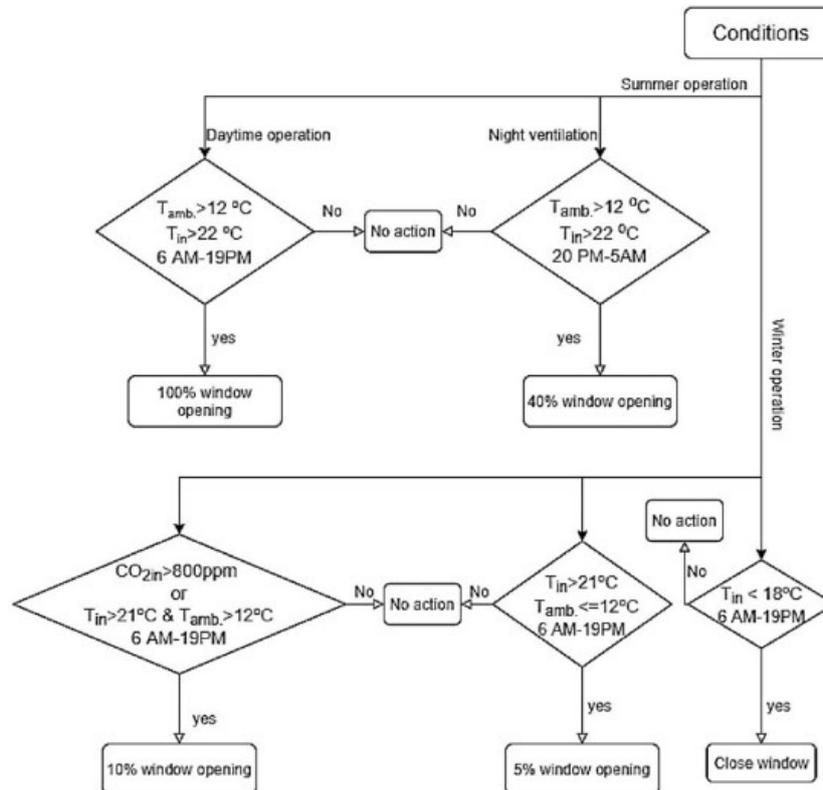


Figura 6. Schema di un controllo RBC per l'apertura delle finestre [11]

### 3.4.3 Facciate a Doppia Pelle (Double Skin Facade, DSF)

Indipendentemente dal controllo della schermatura solare nella cavità di una DSF, la pratica comune per il funzionamento di DSF convenzionali è controllare le aperture della cavità in base alle condizioni al contorno interne ed esterne, commutando principalmente tra una configurazione chiamata Thermal Buffer (TB, che aumenta il livello di separazione tra ambiente interno ed ambiente esterno) ed un percorso d'aria alternativo al TB mirato ad uno scopo specifico, ad esempio la rimozione degli apporti solari indesiderati in estate (configurazione Outdoor Air Curtain , OAC), ovvero per il pre-riscaldamento dell'aria di ventilazione in ingresso (configurazione Supply Air, SA,). Gli algoritmi decisionali comunemente usati per la ventilazione di DSF si basano su RBC, che fanno uso di soglie specifiche relative a (i) condizioni meteorologiche (come temperatura dell'aria esterna, radiazione solare incidente); (ii) variabili fisiche relative alla facciata (ad esempio temperatura della cavità dell'aria); (iii) e/o condizioni interne (come temperatura dell'aria interna, occupazione etc.). Per quanto riguarda la schermatura solare nella cavità, l'opzione di controllo più adottata nelle DSF è di gran lunga quella che impedisce la trasmissione di radiazione solare diretta all'interno dell'ambiente interno quando è occupato, come il controllo secondo l'angolo di cut-off per le veneziane[65], che può, tuttavia, ridurre significativamente la disponibilità di luce diurna. In [66], ad esempio, gli autori hanno proposto un RBC per una DSF a più piani, basato su parametri quali occupazione, temperatura dell'aria della cavità e temperatura dell'aria interna, raggiungendo però solo miglioramenti marginali in termini di fabbisogno di energia per il riscaldamento rispetto ad una DSF di riferimento senza automazione (in TB). In [67], tra tutti i diversi casi di studio di edifici realizzati integranti DSF, vengono implementati solo RBC molto semplici. Ad esempio, l'automazione del percorso dell'aria di ventilazione (tra OAC e TB) della DSF multipiano dell'edificio Helicon (a Londra, Regno Unito), si basa solo sulla differenza tra la temperatura media dell'aria dell'intercapedine e la temperatura interna, mentre i livelli di soglia dell'irraggiamento solare incidente e dell'illuminamento interno in alcuni punti di riferimento sono adottati per controllare l'angolo di inclinazione della veneziana della cavità.

È possibile ottenere una maggiore dinamicità della tecnologia DSF se nella progettazione di una singola DSF sono inclusi contemporaneamente più percorsi dell'aria di ventilazione (ad es. OAC, SA, TB, Exhaust Air, EA, ed Indoor Air Curtain, IAC) integrando più aperture di ventilazione verso l'ambiente interno ed esterno. Questo, insieme al funzionamento del dispositivo di schermatura della cavità, potrebbe rendere la tecnologia DSF un regolatore ambientale ancora più completo, in grado di bilanciare più aspetti di prestazioni dell'edificio (in competizione tra di loro) con un grado ancora maggiore, se automatizzata in modo appropriato ed efficace. In questo caso, un MBC sarebbe la logica adeguata per consentire una gestione in tempo reale di un sistema così complesso. A supporto di ciò, gli autori in [68] hanno implementato un modello a parametri concentrati (modello bianco o grigio) per calcolare quale fosse la configurazione ottimale per una DSF in tempo reale in termini di riduzione del fabbisogno energetico, e massimizzazione di comfort visivo e (avendo come parametri di controllo l'angolo delle lamelle, la modalità di ventilazione, naturale o meccanica, e la configurazione della cavità, TB, SA o OAC). Se tale approccio MBC è possibile, anche considerando un certo orizzonte predittivo, quando bisogna controllare una singola zona termica, risulta computazionalmente molto costoso nel momento in cui in un edificio devono essere coordinate diverse zone termiche, ognuna con la sua DSF. Questo modello è stato quindi conseguentemente adottato dagli autori in [69] per studiare le differenze ed il bilanciamento tra ottimizzazione locale (a livello di stanza / facciata, più semplice e veloce per un numero così grande di variabili di controllo) e centralizzata (a livello di edificio), per l'implementazione di MPC per DSF. I risultati non mostrano differenze significative tra i due approcci di ottimizzazione in termini di risparmio energetico, suggerendo che i controllori decentralizzati locali potrebbero essere efficaci quanto l'ottimizzazione ed il conseguente processo decisionale centralizzato per il caso di studio specifico. Altri esempi hanno mostrato la possibilità di adottare modelli black-box basati su Artificial Neural Network (ANN) per informare il controllo di una DSF in combinazione con un'unità di trattamento d'aria[70]. In particolare, l'MBC informato da ANN per il controllo di una DSF multipiano in un clima tropicale, ha mostrato un miglioramento del 5% del fabbisogno dell'energia di raffreddamento rispetto a un semplice RBC basato sulla temperatura dell'aria della cavità intercapedine ed interna. Recentemente gli autori in [71] hanno studiato i potenziali miglioramenti dell'MBC (senza predizione) applicato ad una DSF, rispetto a strategie euristiche RBC già ottimizzate per il caso studio specifico (uno schema decisionale ad albero di queste ultime è mostrato nella Figura 7). In questo caso di studio, il MBC viene adottato per ottimizzare i carichi termici ed il comfort visivo, implementando tutti i livelli di automazione (field, automation e management) all'interno di un minicontrollore decentralizzato single-board. Nel clima temperato in analisi (Torino, Italia), il MBC è stato in grado di ridurre il fabbisogno energetico complessivo (riscaldamento, raffreddamento ed illuminazione) tra il 12% e il 18%, rispetto ai RBC di riferimento. Inoltre, rispetto al controllo veneziane nella cavità della DSF al cut-off, il MBC è stato in grado di ridurre la quantità di tempo con un illuminamento a livello di scrivania inferiore ai 100 lux (UDI-fs) dal 22% al 9%, e ad aumentare il tempo sopra i 300 lux (UDI-a) dal 45% all'84%.

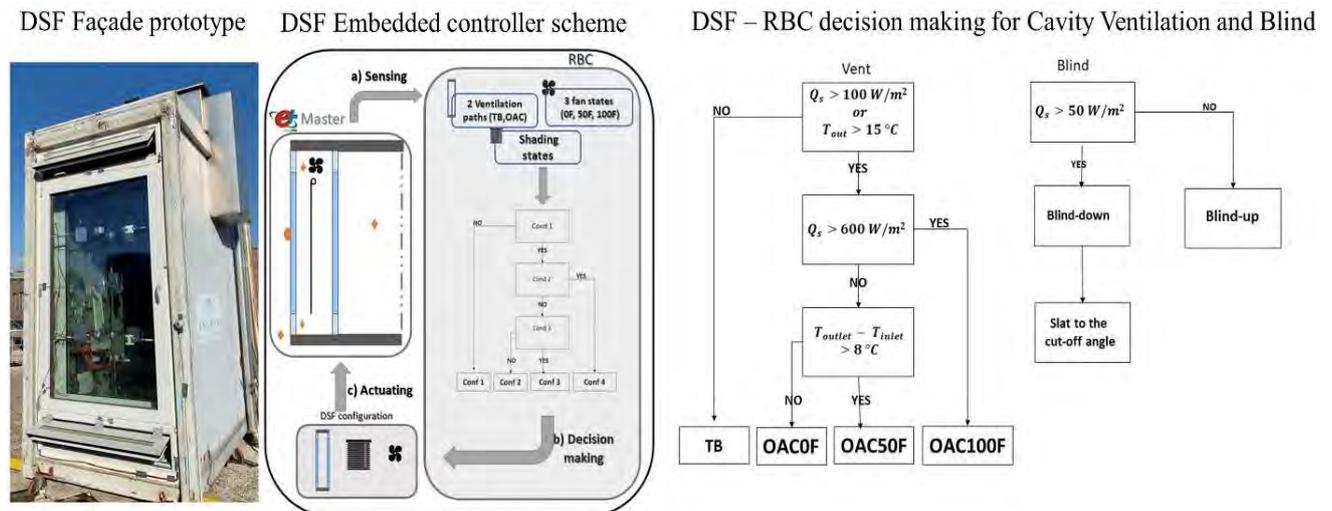


Figura 7. Schemi di controllo RBC per un embedded controller di una DSF [19].

### 3.5 Conclusioni, direzioni future e scopo della ricerca

#### 3.5.1 Requisiti di sistemi di controllo intelligenti e distribuiti per facciate dinamiche e direzioni future

Incorporare l'intelligenza di controllo in involucri edilizi è uno sviluppo naturale quando la pelle dell'edificio si evolve da uno schermo passivo ad un sistema dinamico che, coordinandosi con altri componenti dell'impianto meccanico dell'edificio, contribuisce a fornire un ambiente interno confortevole e salubre con il minimo dispendio energetico. Le prestazioni delle facciate adattive a controllo estrinseco dipendono fortemente dalle logiche di controllo e dai processi decisionali che vengono attuati per gestire le caratteristiche dinamiche dell'involucro. Gli schemi di automazione degli edifici convenzionali, attualmente adottati per gestire componenti dinamici dell'involucro come dispositivi di schermatura o finestre apribili, sono difficilmente adatti per eseguire una gestione efficace di facciate adattive più complesse (per dimensioni, numero di variabili di controllo e di stati) che rispondono a requisiti prestazionali multipli, contrastanti e locali.

La rivoluzione digitale in corso e l'innovazione ICT diventano quindi gli elementi trainanti che consentono funzioni di controllo più avanzate e, di conseguenza, facciate adattive più intelligenti (Böke et al., 2020). Le possibilità tecniche nelle tecnologie di automazione delle facciate sono oggi in forte espansione grazie alla riduzione in termini sia di dimensioni che di costi dei componenti elettronici. I sensori diffusi e i microprocessori consentono la possibilità di acquisire grandi quantità di dati distribuiti, incorporare software e capacità di calcolo distribuite [72]. In combinazione con la possibilità di una rete completa di componenti intelligenti negli impianti meccanici dell'edificio, questo offre un controllo (teorico) senza precedenti sull'ambiente fisico attraverso tecnologie dinamiche dell'involucro dell'edificio. Portare informazioni attendibili (misurate e modellate) sulle condizioni al contorno intorno alla facciata, sia attuali che future (entro un certo orizzonte temporale), permette di sfruttare maggiormente le possibilità offerte dalle caratteristiche dinamiche delle facciate adattive [51] [53]. Questo nuovo paradigma nel controllo richiede un cambiamento da sequenze "semplici" basate su regole a controlli basati su modelli più avanzati. Ciò apre un'interazione completamente nuova tra i diversi nodi di una rete di unità di facciata intelligenti ed elementi edilizi. L'interazione tra un controller locale (integrato nella facciata) e gli altri controller autonomi nell'edificio [22] e con l'occupante sarà una delle principali traiettorie di ricerca per garantire un controllo ottimale distribuito su più domini e livelli della costruzione. È improbabile, però, che modelli complessi e processi computazionalmente costosi siano accessibili nei microcontrollori decentralizzati e questo potrebbe diventare il collo di bottiglia nell'adozione di closed-loop migliorati da modelli. Per tale intelligenza distribuita, al fine di supportare il processo decisionale di controllo nel field e automation layer, c'è una crescente attenzione all'uso di infrastrutture di edge computing (esecuzione di calcoli all'interno di dispositivi distribuiti localmente, che traducono informazioni dal field e automation layer a quello di management e viceversa) rispetto alla più tradizionale elaborazione centralizzata (effettuare calcoli centralmente all'interno del BMS, a partire dalle informazioni raccolte nel field layer, i cui esiti vengono inviati direttamente agli attuatori locali). Bilanciare l'edge computing e il cloud computing nel modo giusto può rappresentare una soluzione praticabile per abilitare strategie di controllo avanzate proprio a livello di facciata senza la necessità di implementare sistemi integrati che possono essere proibitivi (sia in termini di fabbisogno energetico che di costi di investimento). Come sfruttare l'edge computing rispetto al cloud computing è un campo completamente innovativo nel dominio delle facciate adattive e sarà probabilmente un'area molto ricca di ricerca e sviluppo nei prossimi anni.

Oltre alla tecnologia di misura, a quelle di comunicazione e a quelle per il calcolo, l'applicazione ed i progressi nel Machine Learning e nel Data Mining svolgeranno un ruolo cruciale nel passaggio a una facciata intelligente ed autonoma. Ciò è di particolare interesse quando si passa dal controllo basato su regole (RBC)

a quello basato su modelli (MBC), e soprattutto quando l'occupante è incluso nella sequenza di controllo. L'uso di modelli statistici avanzati per il controllo predittivo degli edifici è già una tendenza di ricerca in corso a livello dell'intero edificio (come ad esempio in [73]), e questo include aree applicative di interesse per le facciate (come ad esempio per la gestione di schermature solari per massimizzare il daylight, come in [74]). L'utilizzo di queste tecniche per consentire una migliore interazione utente-facciata garantendo al contempo controlli personalizzati che includano le preferenze dell'utente [75] è una direzione di ricerca necessaria da perseguire, al fine di garantire che un controllo efficace delle facciate adattive sia veramente intelligente, anche dalla prospettiva degli occupanti.

L'introduzione del concetto di intelligenza distribuita nell'edificio, nonché tutte le innovazioni e campi di ricerca menzionati sopra, trasformano la facciata dinamica in un sistema auto-regolante, dotando la facciata stessa dei seguenti elementi:

- sensori, che registrano le condizioni al contorno vicino alla facciata;
- microcontrollori, che convertono i segnali dei sensori in dati, raccolgono/organizzano dati da diverse fonti e li utilizzano in un processo decisionale;
- porte di comunicazione, che inviano segnali agli attuatori di facciata e inviano/ricevono segnali con le altre unità intelligenti all'interno della rete distribuita, per una gestione coordinata.

Le nuove possibilità offerte dall'ICT ed IoT possono svolgere un ruolo cruciale nell'abilitare sequenze di controllo più sofisticate. Infatti, esse consentono ora di immaginare, nei prossimi anni, l'integrazione su larga scala di tali sistemi negli involucri edilizi con un compromesso costi/prestazioni tale da giustificare l'utilizzo di una rete distribuita di componenti intelligenti. Considerando le condizioni specifiche che i sistemi embedded di facciata dovrebbero soddisfare, è possibile identificare diverse priorità per sviluppare e progettare tecnologie di controllo embedded per i sistemi di involucro (Tabella 2). Rispetto ad altri mercati, i sistemi embedded per facciate devono dare priorità alla facile sostituzione e manutenzione, all'estensione della vita utile, alla comunicazione con altri dispositivi, possibilmente a basso costo per tutti i componenti, mentre altre caratteristiche che possono essere cruciali in diverse applicazioni (accuratezza, ridondanza, ingombro, potenza di calcolo, resistenza meccanica) possono essere considerati meno critici.

Questa analisi di letteratura, ed i requisiti per controlli avanzati e controllori embedded menzionati sopra, hanno permesso di indirizzare il successivo lavoro di ricerca sui due casi studio, per testare la fattibilità, l'implementabilità, l'efficacia ed i requisiti di sistemi di controllo model-based avanzati per alcune delle tecnologie dinamiche di involucro analizzate in questa sezione:

- MBC e model-enhanced RBC per ventilazione naturale e controllo della radiazione solare, attraverso un unico elemento di involucro trasparente (vetro camera), integrante schermature solari nella cavità ed apertura automatizzata (Sezione 6);
- MPC per controllo della radiazione solare attraverso vetri dinamici, in una cella di prova in ambiente esterno presso il Politecnico di Torino, con l'obiettivo di minimizzare il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione e l'illuminazione, e massimizzare il comfort termico e visivo (Sezione 4 e 5).

Nelle seguenti sezioni andremo quindi a descrivere le seguenti direzioni di ricerca, scaturite da questa analisi di letteratura, e le loro implicazioni per il fabbisogno energetico (ed i relativi carichi di picco, indipendentemente dal vettore energetico) e per il comfort interno:

- a) Requisiti ed applicazione di controlli MBC per elementi di involucro dinamici, attraverso:
  - la costruzione e calibrazione di modelli energetici ingegneristici relativi ai due mock-up oggetto di studio (Sezione 4.3 e Sezione 6.4, 6.5 e 6.6);
  - elaborazione e sviluppo di modelli ridotti a partire da data set surrogati integrati nel sistema di controllo che includono anche variabili fotometriche (Sezione 5);

- implementazione reale di strategie di controllo MPC nell'apparato sperimentale TWINS presso il Politecnico di Torino (Sezione 6).
- b) Impatto di strategie di controllo model based (MBC) per elementi di involucro dinamici, attraverso:
  - l'analisi per mezzo di simulazioni numeriche della prestazione di strategie di controllo model-based per la riduzione del fabbisogno energetico e per il miglioramento del comfort termico e visivo ambientale interno sull'edificio F40, presso Enea Casaccia (Sezione 4);
  - l'analisi per mezzo di simulazioni numeriche della prestazione di strategie di controllo MPC per la riduzione del fabbisogno energetico e per il miglioramento del comfort termico e visivo ambientale, con l'utilizzo di vetri dinamici elettrocromici (Sezione 6).

**Tabella 2. Priorità e caratteristiche principali per sistemi di controllo embedded per facciate dinamiche attive.**

<b>High priority</b>	<b>Medium priority</b>	<b>Low priority</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- low energy use for system usage (potentially powered through façade-integrated PV systems)</li> <li>- easy replacement and maintenance</li> <li>- communication with other devices</li> <li>- possibilities for user interaction</li> <li>- high system adaptability (software, remote servicing)</li> <li>- high system compatibility with different types of actuators and sensors</li> <li>- autonomous management of failure (watchdog timer)</li> <li>- long lifetime (potentially as long as that of the façade/actuators)</li> <li>- low-cost for both microcontroller and sensors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- relatively minimal footprint</li> <li>- high computational power</li> <li>- large memory</li> <li>- high accuracy in measurements of boundary/process variables</li> <li>- high resistance to harsh environmental conditions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high mechanical resistance (shocks and vibrations)</li> <li>- redundancy of system</li> <li>- high frequency of processing (in the range below the second)</li> <li>- high system adaptability (physical) once installed</li> </ul>

## 4 Controllo avanzato dei sistemi di involucro dinamici in un edificio reale

### 4.1 Caso studio e scopo del lavoro

#### 4.1.1 Caratteristiche del caso studio reale, edificio ENEA F40

Come caso studio relativo al controllo della radiazione solare e ventilazione naturale sono stati selezionati una serie di uffici dell'edificio F40 situato nel Centro Ricerche ENEA Casaccia, presso la città di 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 risulta preponderante, sebbene anche il fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo non sia trascurabile. Gli uffici presi in esame sono situati al primo piano della manica nord-ovest dell'edificio, e corrispondono alle stanze 104-110, come mostrato in Figura 8. Questi ambienti sono dotati di una sola finestra, bipartita ed esposta a 287° (cfr. Figura 8). Durante questo studio i suddetti ambienti sono stati monitorati dal punto di vista termico ed anche per alcune quantità fotometriche, in modo da consentire la validazione dei modelli energetici e di comfort termico e visivo costruiti.

L'ufficio tipo selezionato per lo studio simulativo presenta le seguenti dimensioni: larghezza 3.91 m, lunghezza 4.51 m ed altezza 3.19 m, e si trova a 3.00 m dal piano di campagna (cfr. Figura 9). Esso è circondato da altri spazi climatizzati, ad eccezione della parete Ovest (3.91 m x 3.19 m), su cui è presente una finestra di dimensioni 2.05 x 1.75 m (WWR = 0.42). Questa è posta a 1.10 m dal pavimento, a filo interno del muro, e presenta un'imbotte di profondità pari a 0.30 m. La finestra è bipartita ed è dotata di un'anta apribile a bandiera manualmente o in modo automatizzato di dimensioni 0.67 m x 1.75 m.

Le stratigrafie della chiusura verticale esterna e delle partizioni interne sono presentate in Tabella 3, con relative proprietà termofisiche dei singoli strati. Relativamente alla chiusura esterna, in mattoni a doppio strato a cassetta con intercapedine d'aria, il valore di trasmittanza termica ( $U_{wall}$ ), pari a 0.51 W/m<sup>2</sup>K, è stato corretto in modo da considerare l'effetto dei ponti termici, risultando in un valore finale di trasmittanza termica di 1.16 W/m<sup>2</sup>K. Relativamente ai diversi ponti termici considerati, sono stati assunti i valori di trasmittanza termica lineica contenuti in [76] oppure forniti dal produttore della veneziana (cfr. Tabella 4). Sono state inoltre modellate delle masse interne pari a 300 kg/m<sup>2</sup> per tenere in considerazione la presenza degli arredi interni. La Tabella 5 riporta i coefficienti di riflessione, nello spettro visibile e solare, adottati per le superfici interne degli ambienti.

Le caratteristiche delle finestre e le stanze in cui esse sono applicate sono riportate in Tabella 6. I sistemi vetrati ad alte prestazioni (DGU\_68/36 e TGU\_61/33) presentano una veneziana integrata in intercapedine di larghezza 12.5 mm, con distanziamento delle lamelle di 10 mm. In Tabella 7 sono presentate le caratteristiche dei telai e delle veneziane per i differenti sistemi vetrati.

Lo studio simulativo è stato effettuato limitatamente ad un singolo ambiente, consistente in un ufficio con le caratteristiche geometriche e termiche sopra descritte e con installato il sistema DGU\_68/36 con veneziana s122 s102 integrata. In Tabella 8 si trovano le proprietà ottiche e termiche per questo sistema vetrato per diverse inclinazioni delle lamelle della veneziana, da 0° (orizzontale) a 75°, calcolate tramite il software Window [77].

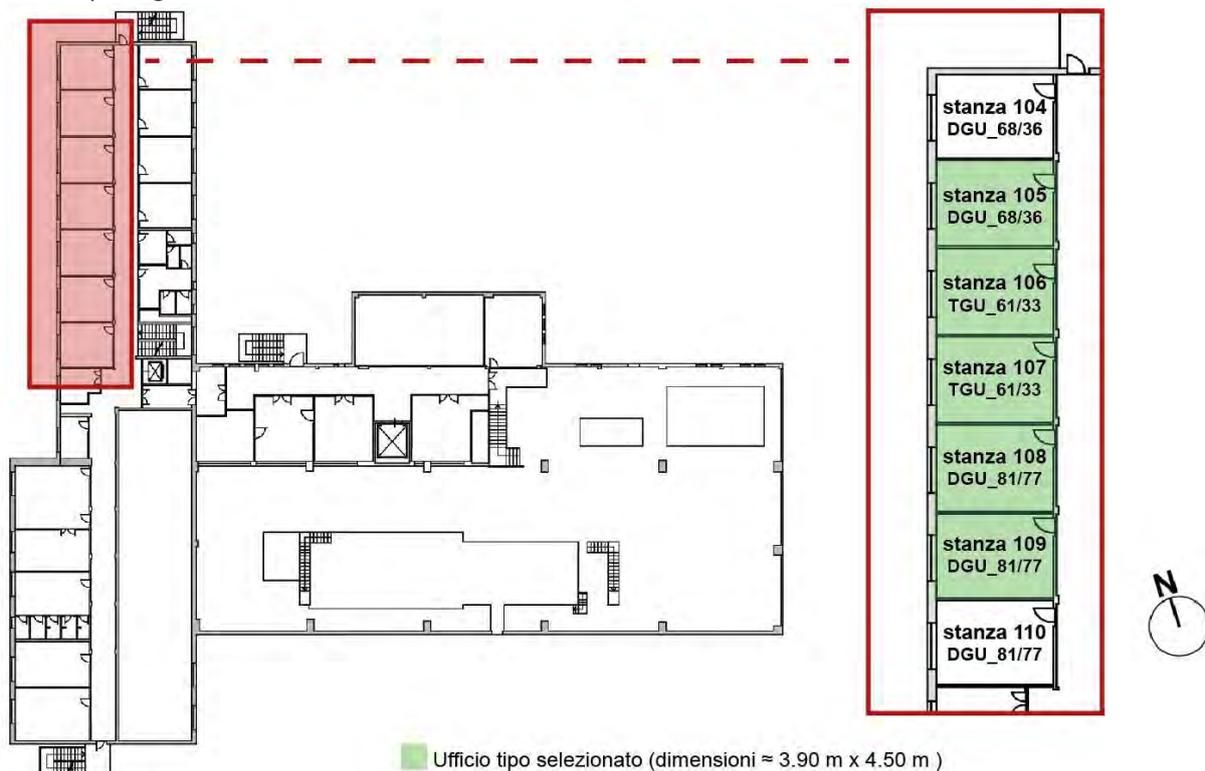
Come impianto di climatizzazione viene considerato un sistema ideale di riscaldamento che mantiene 20°C nel periodo di occupazione e 12°C quando l'ambiente non è occupato, con periodo di accensione dal 1° novembre al 15 aprile [78]. Nelle analisi numeriche in cui è presente un impianto di raffrescamento, dettagliate nel paragrafo 4.5, viene considerato un impianto ideale che mantiene 26°C durante il periodo di occupazione e 30°C quando l'ambiente non è occupato. L'ufficio viene ventilato naturalmente tramite apertura della finestra. Come riferimento nell'analisi numerica è stato considerato uno scenario (teorico) in cui l'ambiente fosse dotato di un sistema di ventilazione meccanica per garantire i ricambi minimi orari da normativa [79] e fosse presente, inoltre, un recuperatore del calore sensibile al 75%. Viene considerato un tasso di infiltrazione calcolato in base alla permeabilità della finestra, secondo la normativa [80] di 0.001 m<sup>3</sup>/s.

Gli occupanti, impiegati in attività di ufficio sedentaria [79], sono considerati presenti all'interno dell'ufficio dalle 8:00 alle 12:00 e dalle 13:00 alle 19:00 nel numero di due persone, mentre dalle 12:00 alle 13:00, si considera la presenza di un solo occupante.

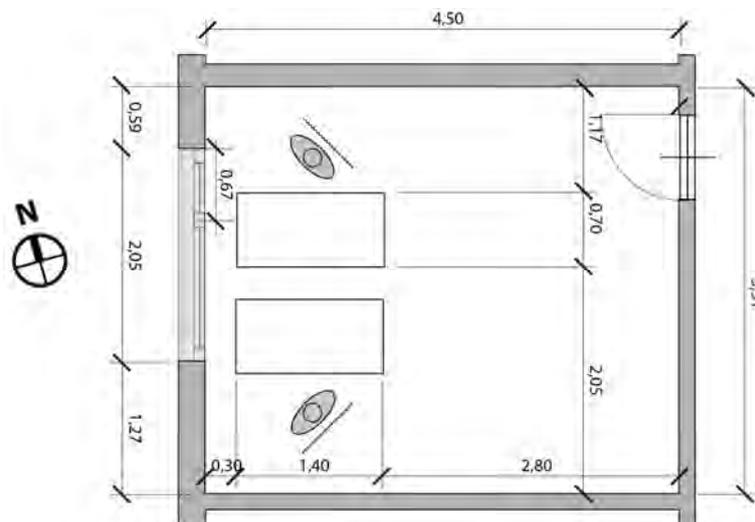
I carichi elettrici dovuti alla presenza di apparecchiature sono stati assunti pari a  $12 \text{ W/m}^2$  [79]. È stato considerato un sistema di illuminazione artificiale dimmerabile e controllato da un fotosensore con ballast loss factor del 10% e potenza di standby di 1 W; l'impianto è costituito da due elementi illuminanti dotati di 3 tubi fluorescenti T5 di potenza pari a 18 W ciascuno, per una potenza totale installata di 108 W.

Il requisito minimo di illuminazione sul piano di lavoro è assunto pari a 300 lx [81], da raggiungere ove possibile tramite l'effetto combinato di luce artificiale e naturale.

In Tabella 9 è possibile leggere una sintesi delle caratteristiche delle IGU e delle validazioni che sono state effettuate per ogni ufficio.



**Figura 8: Planimetria dell'edificio F40, piano primo**



**Figura 9: Ufficio tipo selezionato per l'indagine**

**Tabella 3: Struttura e proprietà delle partizioni degli uffici dell'edificio F40**

	Elemento	s [m]	$\lambda$ [mK/W]	R[W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]	U <sub>correct</sub> [W/m <sup>2</sup> K]
Muro esterno	1) Intonaco interno	0.02	0.90	0.02	0.51	1.16
	2) Mattoni forati 10 cm	0.10	0.37	0.27		
	3) Pannelli semirigidi in fibra di vetro	0.05	0.04	1.25		
	4) Malta di calce	0.01	0.90	0.01		
	5) Mattoni semipieni 14 cm	0.14	0.58	0.24		
	6) Intonaco esterno	0.02	0.90	0.02		
Muro Interno	1) Intonaco interno	0.01	0.90	0.01	2.56	/
	2) Mattoni forati 8 cm	0.08	0.40	0.20		
	3) Intonaco esterno	0.01	0.90	0.01		
Solai	1) Linoleum	0.01	0.16	0.03	1.61	/
	2) Malta di calce	0.05	1.4	0.04		
	3) Polyethylene (PE)	0.001	0.35	0.000		
	4) Solaio in laterocemento	0.24	0.67	0.36		
	5) Intonaco esterno	0.02	0.9	0.02		

**Tabella 4: Ponti termici**

PONTI TERMICI	l	$\psi$	riferimento
Muro - pavimento	3.91	1.05	UNI 14683
Muro - soffitto	3.91	1.05	UNI 14683
Muro - finestra	7.60	0.4	UNI 14683
Distanziatore - telaio old	8.92	0.05	UNI 14683
Distanziatore - telaio new	8.72	0.05	Produttore veneziana

**Tabella 5: Coefficienti di riflessione delle superfici del caso studio**

Superfici e	Soffitto	Muri	Pavimento	Arredi	Porta	Telaio finestra	Facciata esterna	Terreno
R <sub>vis</sub>	0.63	0.81	0.41	0.44	0.05	0.61	0.35	0.2
R <sub>sol</sub>	0.55	0.60	0.16	0.4	0.15	0.7	0.5	0.1

**Tabella 6: Caratteristiche sistemi vetrati edificio F40**

Stanza	IGU	T <sub>vis</sub>	g	Veneziana	Coating	U [W/m <sup>2</sup> ]	Sistema
104 - 105	DGU_68/36	0.68	0.36	SL22 s102 (bianco)	#2 GT Combi neutral 70/35	1.1	44.2/22/44.2
106 - 107	TGU_61/33	0.61	0.33	SL22 v95 (alluminio)	#2 GT Combi neutral 70/35 #5 GT Enplus	0.5	44.2/22/6/16/44.2
108 - 110	DGU_81/77	0.81	0.77			3.0	4/9/4

**Tabella 7: Caratteristiche dei telai e delle veneziane dei sistemi vetrati edificio F40**

Telaio	U <sub>telaio</sub>	veneziana	Colore	ε <sub>f</sub>	ε <sub>b</sub>	R <sub>vis,blind</sub>	R <sub>sol,blind</sub>
T_DGU_68/36	1.4	s102	bianco	0.83	0.83	0.74	0.67
T_TGU_61/33	1.5	v95	alluminio	0.08	0.4	0.87	0.78
T_DGU_81/77	5.7	/	/	/	/	/	/

**Tabella 8: Caratteristiche ottiche e termiche del sistema vetrato DGU\_68/36**

Inclinazione [°]	T <sub>vis</sub> [-]	T <sub>sol</sub> [-]	g [-]
/	0.78	0.45	0.57
0°	0.72	0.41	0.55
15°	0.58	0.33	0.48
30°	0.38	0.22	0.38
45°	0.19	0.11	0.26
60°	0.08	0.05	0.18
75°	0.03	0.02	0.13

**Tabella 9: Caratteristiche, validazioni e simulazioni su uffici edifici F40**

Stanza	IGU	Dimensioni [m]	Veneziana	Validazione termica	Validazione termica con Ventilazione Naturale	Validazione daylight	Simulazioni termiche e daylight
104	DGU_81/77	3.71 x 4.51	SL22 s102	Agosto			
105	DGU_81/77	3.88 x 4.51	SL22 s102	Agosto; Maggio	x	x	x
106	TGU_61/33	3.91 x 4.51	SL22 v95	Agosto	x		
107	TGU_61/33	3.88 x 4.51	SL22 v95	Agosto	x		
108	DGU_68/36	3.91 x 4.51		Agosto			
109	DGU_68/36	3.84 x 4.51		Agosto			
110	DGU_68/36	3.82 x 4.51		Agosto; Maggio			

#### 4.1.2 Scopo e metodologia

L'obiettivo del lavoro consiste nell'elaborazione di controlli avanzati per il raggiungimento di obiettivi di comfort in diversi ambiti, e in particolare di comfort termico, visivo e di qualità dell'aria, minimizzando allo stesso tempo il dispendio energetico e i carichi elettrici. Tali obiettivi vengono susseguiti tramite il controllo di sistemi di involucro automatizzabili (finestre con apertura automatizzata per la ventilazione e veneziane integrate in cavità regolabili tramite BMS). Vengono esaminate diverse strategie di controllo Model-based e Rule-based, le quali sono confrontate sia con i casi di riferimento selezionati da letteratura, sia con un sistema vetrato non dotato di schermature mobili, quali le stanze 108-110 dell'edificio di riferimento. Vengono controllate sia l'operazione delle veneziane, volta a seconda dei casi a limitare gli apporti solari e dunque i carichi e il dispendio energetico estivi, i fenomeni di abbagliamento e di surriscaldamento, sia l'apertura delle finestre, atta ad incrementare la qualità dell'aria, il comfort termico, e equilibrare la temperatura dell'aria in base alla stagione, limitando il riscaldamento e il condizionamento estivo.

La necessità di valutare l'effetto delle operazioni di controllo in maniera accurata su diversi domini (energetico, comfort visivo, comfort termico, qualità dell'aria) ha reso necessario l'utilizzo di software

specifici per i diversi ambiti: è stata dunque innanzitutto sviluppata un'architettura di co-simulazione che consentisse di valutare in maniera accurata e simultanea i diversi aspetti di interesse in relazione al controllo di veneziane ed apertura della finestra. Tale architettura fa uso di modelli accurati e specifici per la valutazione degli aspetti energetici e di comfort visivo, i quali sono anche stati validati sulla base di dati sperimentali raccolti nell'ufficio considerato dell'edificio F40 (vedere sezione 4.3).

Grazie all'architettura di co-simulazione sviluppata è stato possibile effettuare un'analisi comparativa delle strategie RBC e MBC, confrontando i risultati relativi a diverse strategie di controllo in termini di comfort dell'occupante, dispendio energetico e carichi di picco in ambiente. Analizzando nel dettaglio la prestazione delle strategie di controllo è stato possibile valutare l'effetto dell'operazione della schermatura e dell'apertura della finestra nei diversi ambiti esaminati. Ciò ha consentito di individuare i punti di forza e di debolezza di ciascuna strategia, e quindi in ultima analisi di ottimizzare il controllo della veneziana e dell'apertura della finestra, con l'obiettivo - come attività futura - di progettare un'automazione implementabile in campo sull'edificio F40.

## 4.2 Metodologia di Simulazione

### 4.2.1 Architettura di simulazione

L'architettura di simulazione proposta in questo studio è stata sviluppata al fine di poter valutare simultaneamente gli effetti derivanti dal controllo delle veneziane e dell'apertura delle finestre sulla prestazione energetica dell'ambiente in esame, sul comfort termico e visivo dell'occupante e sulla qualità dell'aria. Al fine di ottenere un'elevata accuratezza nei risultati, diversi software di simulazione, specifici per ciascun aspetto in esame, sono stati utilizzati contemporaneamente (co-simulazione). Nello specifico, per le valutazioni termo-energetiche è stato utilizzato il software EnergyPlus[82], mentre per la simulazione della luce naturale (daylight) è stata utilizzata la suite di software Radiance[83]. Attraverso Radiance è stato possibile valutare accuratamente il comfort visivo dell'utente ed anche la radiazione solare che lo colpisce, la quale, come si vedrà in seguito, risulta necessaria per una valutazione precisa del comfort termico dell'occupante.

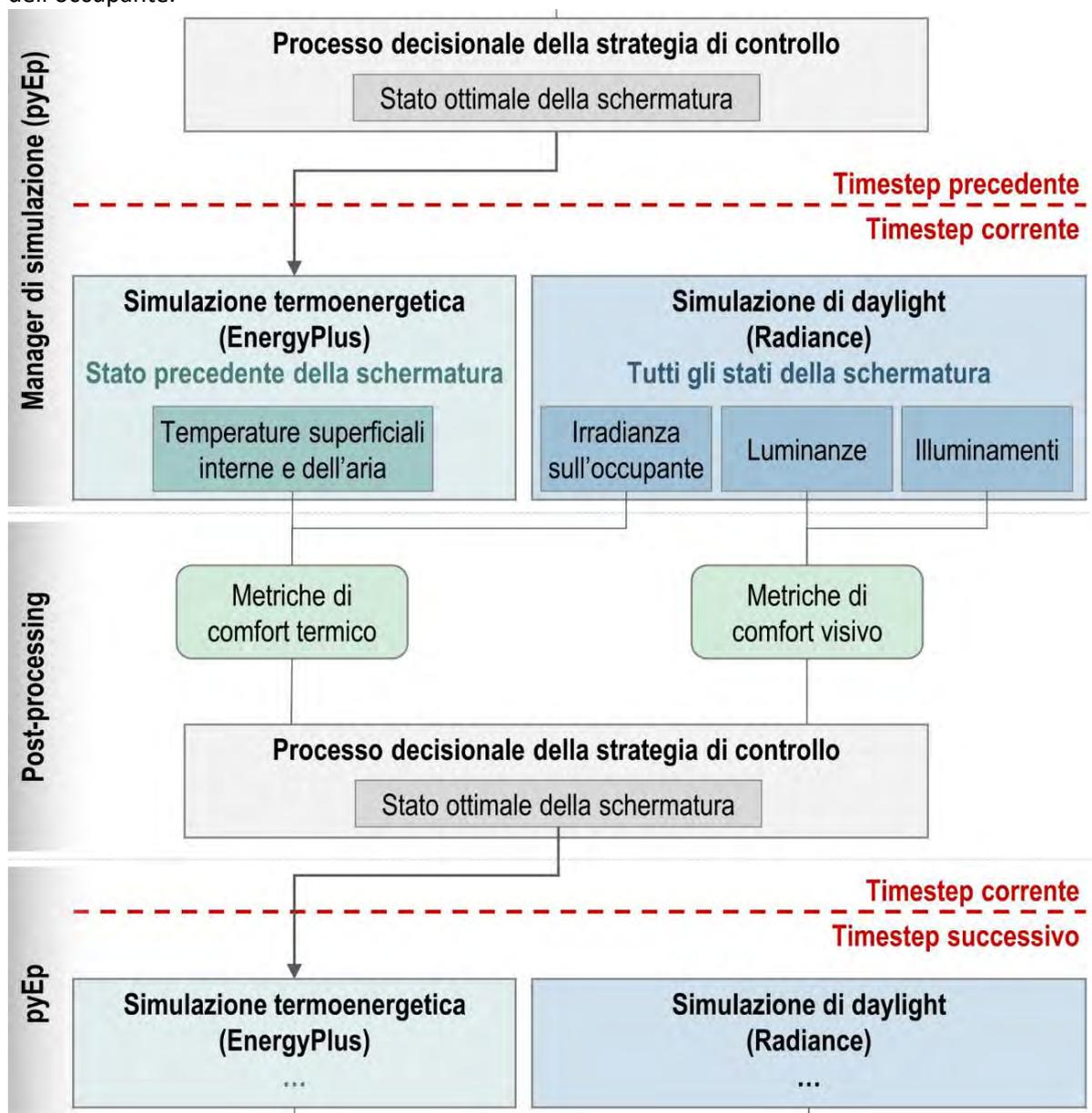


Figura 10. Schema dell'algoritmo di co-simulazione all'interno del singolo timestep.

Il processo di co-simulazione è stato gestito attraverso la libreria di python pyEp[84], la quale, utilizzando in background il software Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)[85], consente lo scambio di informazioni tra Radiance ed EnergyPlus direttamente all'interno della routine di simulazione. Tramite pyEp ed il modulo di EnergyPlus *ExternalInterface* è possibile quindi arrestare la simulazione di EnergyPlus ad ogni singolo timestep per effettuare computazioni esterne alla routine simulativa (incluse simulazioni di daylight) e sovrascrivere le variabili interne di EnergyPlus. Nello specifico, l'algoritmo di co-simulazione all'interno del singolo timestep si compone dei seguenti passaggi (cfr. Figura 10):

1. pyEp arresta la simulazione di EnergyPlus dopo che le computazioni termiche ed energetiche all'interno del singolo timestep sono state completate;
2. pyEp lancia Radiance per il medesimo timestep al fine di calcolare, per ogni stato delle veneziane considerato, l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro, la radiazione solare che colpisce l'occupante ed il suo livello di abbagliamento da luce diurna;
3. I risultati di daylight e termici sono processati in modo da valutare il livello di comfort termico e visivo dell'occupante relativo ad ogni stato delle veneziane considerato. Lo stato delle veneziane più appropriato viene quindi definito a seconda della strategia di controllo considerata;
4. Lo stato delle veneziane viene quindi sovrascritto all'interno di EnergyPlus e la simulazione procede al timestep successivo.

Il modello energetico è un modello dinamico dettagliato costruito su EnergyPlus e con le caratteristiche descritte nella sezione 4.1. Il componente trasparente è stato modellato tramite il software Window [77] e integrato come BSDF nel modello di EnergyPlus. Le portate di infiltrazione sono state calcolate internamente in EnergyPlus a partire dal tasso di infiltrazione determinato da normativa secondo il modello DOE. La portata di ventilazione naturale dovuta all'apertura della finestra considera sia l'effetto della velocità del vento, sia l'effetto camino. L'ufficio viene considerato circondato da spazi caratterizzati da identiche condizioni termiche.

Per quanto concerne il comfort termico, come detto, è stato utilizzato un modello in grado di valutare l'effetto della radiazione ad alta lunghezza d'onda ed anche a bassa lunghezza d'onda sulla sensazione di comfort dell'occupante. Ciò è stato fatto calcolando innanzitutto la temperatura media radiante (MRT) considerando la sola radiazione ad alta lunghezza d'onda, valore poi corretto tramite un fattore ( $\Delta MRT$ ) che tenga in considerazione l'effetto della radiazione a bassa lunghezza d'onda, cioè la radiazione solare che colpisce direttamente l'occupante [86]. Quest'ultima quantità è stata calcolata attraverso Radiance come media delle irradianze, pesata sull'area, su ciascuna delle 29 aree elementari in cui è suddiviso il manichino semplificato utilizzato in questo tipo di valutazioni sul comfort termico [87]. Tale manichino, utilizzato per simulare l'occupante in posizione seduta, è costituito da un parallelepipedo di dimensioni 0.35 m x 0.35 m x 1.05 m (altezza) per simulare il corpo dell'utente, sormontato da un secondo parallelepipedo, di dimensioni 0.15 m x 0.13 m x 0.35 m (altezza), per simularne la testa. Infine, utilizzando la MRT così corretta viene calcolata la temperatura operativa ( $T_{op}^*$ ). Come già dimostrato da studi recenti [32] la valutazione del comfort termico effettuata tramite la  $T_{op}^*$  porta a risultati anche significativamente differenti se comparati con le stesse valutazioni effettuate tramite la  $T_{op}$  non corretta. La  $T_{op}^*$  viene quindi confrontata con i valori di  $T_{op}$  che delimitano l'intervallo di comfort, per come definiti da [79] in relazione agli edifici naturalmente ventilati. Questi limiti, che variano a seconda della temperatura dell'aria esterna, vengono calcolati sulla base della *Running Mean Temperature* ( $T_{rm}$ ), cioè una media pesata delle temperature esterne degli ultimi sette giorni, che per questo studio è stata calcolata secondo la seguente formula approssimata:

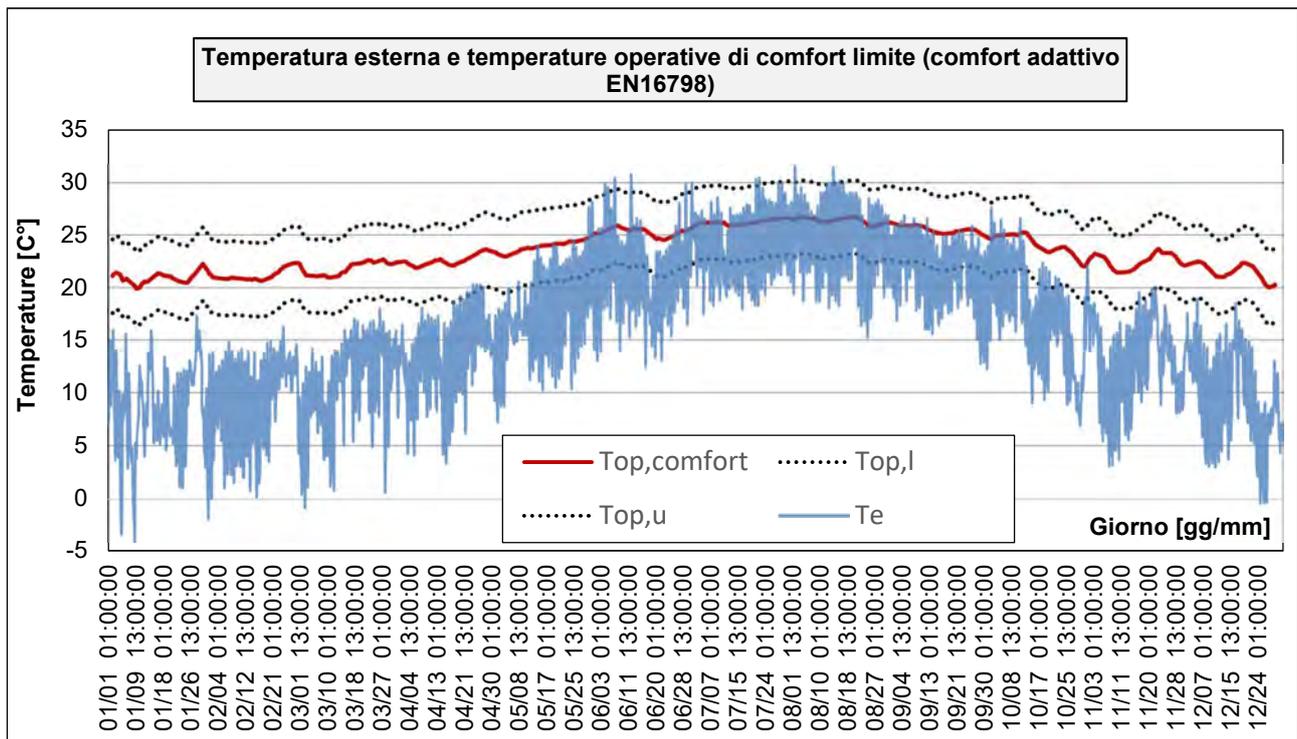
$$T_{rm} = \frac{T_{ed-1} + 0.8 \cdot T_{ed-2} + 0.6 \cdot T_{ed-3} + 0.5 \cdot T_{ed-4} + 0.4 \cdot T_{ed-5} + 0.3 \cdot T_{ed-6} + 0.2 \cdot T_{ed-7}}{3.8} \quad [^{\circ}C] \quad (4.1)$$

In cui  $T_{ed-i}$  è la temperatura media giornaliera dell'aria esterna per l'i-esimo giorno precedente al giorno considerato. A partire dalla  $T_{rm}$  è quindi possibile definire, per uno specifico giorno, i limiti minimo ( $T_{op,i}$ ) e massimo ( $T_{op,u}$ ) di temperatura operativa (sia essa  $T_{op}$  o  $T_{op}^*$ ) accettabile, i quali variano a seconda della classe

di comfort considerata. Per il presente studio, nel quale la categoria II di comfort termico è stata considerata, tali limiti vengono calcolati nella maniera seguente:

$$\begin{cases} T_{op,u} = 0.33 \cdot T_{rm} + 18.8 + 3 \\ T_{op,l} = 0.33 \cdot T_{rm} + 18.8 - 4 \end{cases} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.2)$$

Si noti che i limiti  $T_{op,l}$  e  $T_{op,u}$  sono entrambi definiti a partire dall'espressione  $0.33 \cdot T_{rm} + 18.8$ , che rappresenta il valore ottimale di temperatura operativa ( $T_{op,opt}$ ). Quindi, nella categoria di comfort II, sono di fatto considerati come accettabili valori di  $T_{op}$  (o  $T_{op}^*$ ) superiori fino a 3 °C rispetto al valore  $T_{op,opt}$  ed inferiori ad esso di un massimo di 4 °C. In Figura 11 è possibile osservare l'andamento di queste temperature nell'anno: si legga in blu l'andamento della temperatura esterna, in rosso il valore di  $T_{op,opt}$  e in nero i limiti inferiore e superiore della temperatura di comfort.



**Figura 11: profili di temperatura esterna e temperature di comfort per Roma in un anno tipico**

Per quanto riguarda invece il modello per il calcolo delle quantità fotometriche (i.e. illuminamenti e luminanze) per la valutazione del comfort visivo dell'occupante, si è scelto di utilizzare il cosiddetto modello a cinque fasi di Radiance (5-Phase Method – 5PM)[88]. Tale modello gestisce la componente diretta della radiazione solare separatamente da quella diffusa (volta celeste ed inter-riflessioni), consentendo di conseguenza una maggiore accuratezza nella valutazione della distribuzione della radiazione solare diretta all'interno di un ambiente dotato di sistemi di schermatura complessi. Nello specifico, la quantità fotometrica, sia essa illuminamento o luminanza, viene calcolata utilizzando un modello di cielo (CIE o Perez) suddiviso in 145 sezioni elementari[89], dopodiché, sempre per lo stesso modello di cielo, viene calcolato il contributo della sola radiazione diretta, valore che viene sottratto al risultato globale per determinare quale sia il contributo della sola radiazione diffusa. Infine, utilizzando un modello di cielo con un maggior numero di suddivisioni (5185), viene calcolato il contributo della sola radiazione diretta, considerando il sole come un disco con angolo solido pari a 0.533 sr la cui posizione è discretizzata ponendolo al centro della patch più vicina alla sua posizione reale. Tale soluzione consente di ottenere un risultato più accurato per la componente diretta rispetto a quanto ottenuto per un cielo con "sole" 145 suddivisioni. Infine, le componenti diretta e diffusa sono sommate per determinare il valore globale per la quantità fotometrica analizzata. Per questo studio i seguenti parametri sono stati utilizzati: -ab 6, -ad 20000, -lw 0.00002. La descrizione del modello di trasmissione e riflessione per il pacchetto "componente trasparente + veneziana", il cosiddetto

*Bidirectional Scattering Distribution Function* (BSDF), necessario nel metodo a 5 fasi, è stata ricavata, per la DGU considerata e le lamelle della veneziana poste a 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°, tramite il software Window [77].

Le posizioni dei sensori, del manichino ed il punto di vista considerati per le valutazioni di comfort termico e visivo sono mostrate in Figura 12.

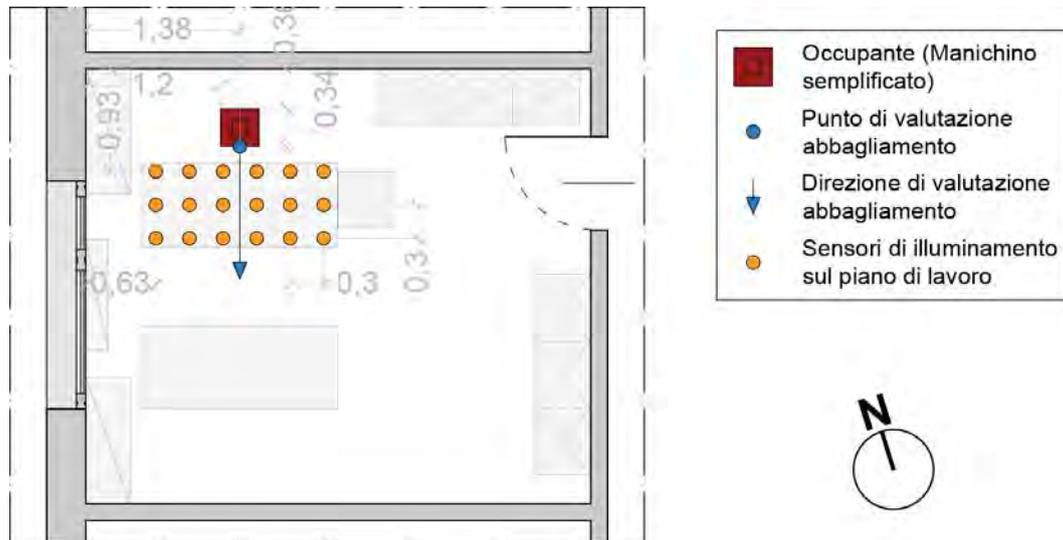


Figura 12. Posizione all'interno dell'ufficio dei sensori di illuminazione, del manichino per il calcolo del comfort termico e di punto di vista e direzione di osservazione per il calcolo dell'abbagliamento.

#### 4.2.2 Obiettivi – Key Performance Indicators

L'obiettivo di questo studio è costituito da un'ottimizzazione della prestazione dell'edificio in diversi domini: energetico, comfort termico e visivo e qualità dell'aria.

Relativamente all'aspetto energetico, l'obiettivo dello studio è la minimizzazione del fabbisogno energetico ed anche la minimizzazione dei carichi massimi di progetto. Relativamente al fabbisogno di energia primaria è stato assunto come parametro di valutazione l'indice di prestazione energetica globale ( $EP_{gl}$ ), definito come il fabbisogno annuale di energia primaria per unità di area utile:

$$EP_{gl} = EP_H + EP_C + EP_L \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ a}] \quad (4.3)$$

In cui  $EP_H$ ,  $EP_C$ ,  $EP_L$  sono rispettivamente i fabbisogni di energia primaria, su base annua e per unità di superficie utile, relativi ai servizi di riscaldamento, raffrescamento (ove considerato) ed illuminazione. Le efficienze globali per gli impianti di riscaldamento e raffrescamento sono state assunte rispettivamente pari a 0.85 e 3.1, mentre per la conversione da energia elettrica a primaria è stato considerato un fattore pari a 2.42.

Per quanto riguarda i carichi massimi di progetto, sono stati considerati i percentili al 99% del carico in Watt fornito dall'impianto ideale all'ufficio per ogni timestep, sia nel caso di riscaldamento invernale ( $P_{p,heating}$ ) che di raffrescamento estivo ( $P_{p,cooling}$ ).

Il discomfort termico dell'occupante è stato valutato quantificando la frazione delle ore di occupazione in cui il valore di temperatura operativa non ricadesse all'interno del range di comfort relativo alla categoria di comfort II, per come definito in [79]:

$$T_{op,discomfort} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i (T_{op}^* < T_{op,l} \vee T_{op}^* > T_{op,u})}{n} \Big|_{occ} \quad [\%] \quad (4.4)$$

In cui  $T_{op}^*$  è la temperatura operativa modificata per considerare anche l'effetto della radiazione solare diretta;  $T_{op,l}$  e  $T_{op,u}$  sono rispettivamente i limiti del range di comfort inferiore e superiore;  $t_i$  sono le ore di occupazione in cui la temperatura operativa non ricade all'interno del range di comfort;  $n$  sono le ore di occupazione nell'anno.

Il comfort visivo dell'occupante è stato valutato attraverso due parametri distinti, lo Useful Daylight Illuminance (UDI) e il Daylight Glare Probability (DGP). Lo UDI [90] valuta la frazione di ore occupate in cui l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro si trova al di sotto ( $UDI_{fell-short}$ ), all'interno ( $UDI_{achieved}$ ) ed al di sopra ( $UDI_{exceeded}$ ) del "range di luce utile", compreso tra 100 lx e 3000 lx. Al di sotto di 100 lx la luce naturale è considerata troppo scarsa per lo svolgimento di un compito visivo, mentre al di sopra di 3000 lx quest'ultima risulta troppo elevata, producendo potenzialmente fenomeni di discomfort ed abbagliamento. Le formule utilizzate per il calcolo dello UDI sono le seguenti:

$$UDI_{fell-short} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i(E_{wp} < 100 \text{ lx})}{n} \Bigg|_{occ} \quad [\%] \quad (4.5)$$

$$UDI_{achieved} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i(100 \text{ lx} \leq E_{wp} < 3000 \text{ lx})}{n} \Bigg|_{occ} \quad [\%] \quad (4.6)$$

$$UDI_{exceeded} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i(E_{wp} \geq 3000 \text{ lx})}{n} \Bigg|_{occ} \quad [\%] \quad (4.7)$$

Dove  $E_{wp}$  è l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro;  $t_i$  sono le ore di occupazione in cui l'illuminamento orizzontale soddisfa un determinato requisito, a seconda che  $UDI_{fell-short}$ ,  $UDI_{achieved}$  o  $UDI_{exceeded}$  siano considerati;  $n$  sono le ore di occupazione nell'anno. In questo studio è stato considerato il parametro  $UDI_{discomfort}$  che indica la frazione di ore occupate in cui l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro non è all'interno del "range di luce utile". Esso è calcolato sommando le medie degli indici  $UDI_{fell-short}$  e  $UDI_{exceeded}$  relativi a tutti i sensori sul piano di lavoro considerati.

Il DGP [91] valuta la frazione di persone insoddisfatte rispetto ad un ambiente luminoso o scena luminosa. L'intervallo del DGP (0-1) è suddiviso in quattro classi di comfort[92]: abbagliamento *impercettibile*, *percettibile*, *disturbatore* e *molesto*. In questo studio un è stato assunto un requisito di abbagliamento *impercettibile* o *percettibile* ( $DGP < 0.40$ ), in analogia con il requisito adottato per il comfort termico (categoria II). Il discomfort visivo annuale dovuto all'abbagliamento è stato valutato quantificando la frazione di ore occupate in cui il DGP fosse superiore a 0.40:

$$DGP_{discomfort} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i(DGP > 0.40)}{n} \Bigg|_{occ} \quad [\%] \quad (4.8)$$

In cui  $t_i$  sono le ore di occupazione in cui il DGP è al di sopra di 0.40;  $n$  sono le ore di occupazione in un anno.

La qualità dell'aria è stata valutata mediante due parametri: il primo, definito  $CO_{2,discomfort}$ , corrisponde alla percentuale di tempo in cui il valore di  $CO_2$  è al di sopra della soglia identificata dalla categoria II della norma [79]. Tale soglia corrisponde a un valore di 800 ppm superiore al valore registrato esternamente:

$$CO_{2,discomfort} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i(CO_2 \text{ ppm} > ppm_{est} + 800)}{n} \Bigg|_{occ} \quad [\%] \quad (4.9)$$

In cui  $t_i$  sono le ore di occupazione in cui la  $CO_2$  è al di sopra del valore limite e  $n$  sono le ore di occupazione in un anno.

Il secondo parametro, definito  $ACH_{unsatisfied}$  indica il soddisfacimento annuale dei ricambi orari minimi giornalieri calcolati secondo la normativa CEN 16798-2 [93]. Esso viene calcolato sommando la percentuale di soddisfacimento dei ricambi orari minimi giornalieri definiti dalla normativa e dividendolo per il numero di giorni considerati.

$$ACH_{unsatisfied} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^d t_i (ACH_{giornaliero,i} \geq ACH_{14644}) + \sum_{k=1}^d t_k \left( \frac{ACH_{giornaliero,k} < ACH_{14644,k}}{ACH_{14644,k}} \right)}{d} \Bigg|_{occ} \quad [\%] \quad (4.10)$$

In cui  $t_i$  sono le ore di occupazione in cui i ricambi orari giornalieri vengono soddisfatti, e  $t_k$  sono le ore di occupazione in cui i ricambi orari giornalieri sono al di sotto del limite richiesto da normativa;  $d$  sono i giorni di occupazione annuali.

### 4.3 Validazione e calibrazione dei modelli

L'analisi simulativa è stata effettuata utilizzando due modelli: un modello per le valutazioni termoeconomiche è stato costruito su EnergyPlus, mentre il modello per lo studio della luce è stato costruito su Radiance. Tali modelli sono stati validati confrontando i dati di illuminamento e temperatura interna misurati sperimentalmente con quelli derivanti dalle simulazioni dei due modelli utilizzando le stesse condizioni climatiche. In Figura 13 sono riportate le posizioni dei sensori utilizzati per la raccolta dei dati.



Figura 13: Posizione di luxmetri, piranometro e sensori di temperatura all'interno dell'ufficio (altezza dal pavimento: 0.83 m)

#### 4.3.1 Validazione e calibrazione modello termico – EnergyPlus

La validazione del modello viene effettuata comparando i dati misurati in due diversi periodi con i risultati derivanti dal modello energetico utilizzando gli input climatici misurati sperimentalmente. La temperatura interna degli uffici dell'edificio F40 è stata monitorata in condizioni di free running, in agosto 2020 e maggio 2021, in modo garantire una calibrazione in presenza di differenti condizioni climatiche esterne.

Il primo set di dati è relativo al periodo 5-19 agosto 2020, e comprende i dati di temperatura delle 7 stanze considerate e delle stanze adiacenti sia sul piano inferiore che superiore, e dei corridoi. Le temperature sono registrate dai termostati attaccati al muro dove è presente la porta di entrata. Sono stati monitorati anche i dati di Irradianza globale, diretta e diffusa, di temperatura esterna, di velocità e direzione del vento. Nei giorni 5-14 agosto le finestre sono tutte chiuse, mentre dal 15 al 19 agosto le finestre delle stanze 105, 106 e 107 vengono aperte secondo una schedule oraria notturna dalle 21:00 alle 8:00. Il modello viene simulato inserendo come condizioni al contorno le temperature delle stanze adiacenti. La stanza 105 dove è installato il sistema vetrato DGU\_68/36 viene monitorata anche nel periodo 8-18 maggio, mentre la stanza 110, con installato il sistema vetrato DGU\_81/77 viene monitorata dal 13 al 3 giugno. In entrambe le stanze le finestre rimangono chiuse. Per questo periodo sono stati forniti i dati di temperatura interna misurati in due posizioni,

dal termostato attaccato alla porta di entrata e da un sensore in centro stanza, i dati di temperatura esterna e di Irradianza globale. In questo caso i dati di irradianza diretta e diffusa sono dunque stati calcolati a posteriori tramite il modello di Erbs [94]. Non avendo a disposizione le temperature delle stanze adiacenti in questo caso sono state settate come condizioni al contorno le temperature registrate sperimentalmente nelle stanze considerate.

Il modello validato in questa sede ha le caratteristiche descritte nella sezione 4.1.1. Viene considerato un tasso di infiltrazione calcolato in base alla permeabilità della finestra, secondo la normativa UNI 1026:2016 [80] di 0.001 m<sup>3</sup>/s (classe 3) per la DGU\_68/36, 0.001 m<sup>3</sup>/s (classe 3) per la TGU\_61/33, e 0.003 m<sup>3</sup>/s (classe 2) per la DGU\_81/77.

Sono state inoltre modellate le ostruzioni presenti nel raggio di 70 metri dall'edificio ospitante gli uffici.

Nel processo di calibrazione del modello sono stati corretti alcuni parametri in base al confronto tra le osservazioni e i dati simulati. In particolare è stata aumentata il valore di densità dello strato in laterocemento del pavimento fino a 1750 kg/m<sup>3</sup>. Anche l'area di apertura della finestra è stata soggetta a correzioni: la percentuale di apertura ottenuta secondo il calcolo geometrico da [95] risulta essere del 32%. Nel processo di calibrazione viene identificata come ottimale una percentuale di apertura pari al 12%, con un coefficiente di perdite di carico pari circa a 0.4 rispetto al dato geometrico puro calcolato.

In Figura 14 è possibile vedere i risultati relativi alle stanze con DGU di riferimento 4/9/4. Si può notare come il caso studio sia altamente massivo e perciò poco soggetto alle variazioni di temperatura interna: l'andamento delle temperature ottenuto a livello simulativo risulta molto simile all'andamento monitorato sperimentalmente. Nel monitoraggio relativo ad agosto è possibile notare come nei dati sperimentali si registri un innalzamento della temperatura notturno, che pare essere dovuto a un carico energetico. Non è stato possibile identificare la fonte di questo carico, che perciò non è stato considerato per la validazione. Nel monitoraggio relativo a maggio, presentato in Figura 14C, si nota come il profilo di temperatura misurata dai due sensori nelle due posizioni sia diverso: in particolare il sensore al centro della stanza presenta dei picchi di temperatura alle 18:00 circa. L'andamento dei profili di temperatura simulato è molto vicino ai dati misurati sperimentalmente dal termostato vicino alla porta.

Nel caso delle stanze con DGU\_68/36 il modello identifica in modo adeguato il profilo di andamento delle temperature. Come è possibile osservare in Figura 15A nel periodo di agosto nella stanza 104 il modello sottostima leggermente la temperatura nei momenti notturni. Nello stesso periodo nella stanza 105 (Figura 15B) il modello identifica in modo molto accurato il profilo con finestra chiusa. Nei momenti in cui viene aperta la finestra (Figura 15C) si registra una leggera sovrastima della temperatura da parte del modello, mentre il profilo presenta un leggero ritardo dovuto probabilmente all'inerzia. Com'è possibile osservare nella Figura 15D, nel periodo di maggio – dove è possibile notare il fenomeno descritto anche per la stanza 110, ovvero un picco di temperatura alle 18:00 - l'andamento dei profili di temperatura dei modelli delle due stanze è molto vicina ai dati misurati sperimentalmente dal termostato vicino alla porta.

Nel caso delle stanze con TGU\_61/33 il modello identifica in modo adeguato il profilo di andamento delle temperature. Come è possibile vedere in Figura 16 il modello l'andamento ottenuto numericamente e quello rilevato sperimentalmente risultano molto simili sia nel caso con finestra chiusa, sia quando è presente la ventilazione notturna.

Per avere una stima quantitativa dello scarto tra dati misurati e simulati sono stati calcolati quattro indicatori:

- Mean Bias Error (MBE):

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{sim} - x_{exp})}{\sum_{i=1}^n x_{exp}} \cdot 100 \quad (4.11)$$

- Root Mean Square Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sim} - x_{exp})^2} \quad (4.12)$$

- Coefficient of Root Mean Square Error CV(RMSE):

$$CV(RMSE)(\%) = \frac{RMSE}{x_{exp}} \cdot 100 \quad (4.13)$$

- Percentage Root Mean Square Error (PRMSE):

$$PRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_{sim} - x_{exp}}{x_{exp}} \right)^2} \quad (4.14)$$

In Tabella 10 e Tabella 11 è possibile leggere il valore degli indici presentati precedentemente per i due periodi monitorati: confrontandoli con i limiti definiti dall'ASHRAE 14-2002 [96] essi risultano tutti abbondantemente al di sotto della soglia limite.

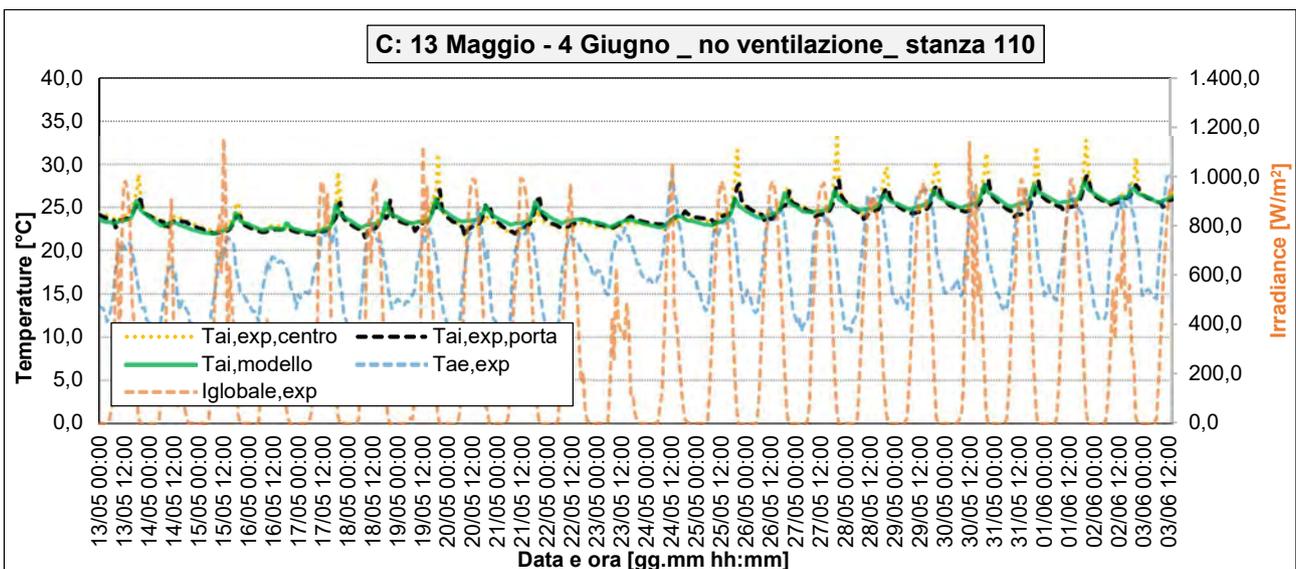
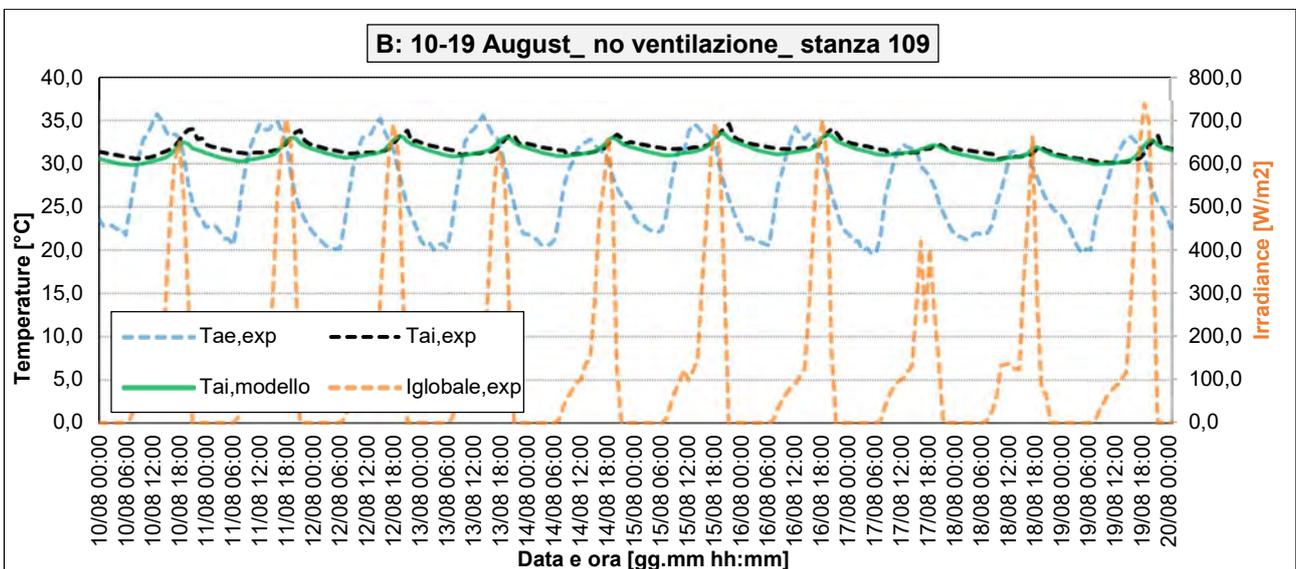
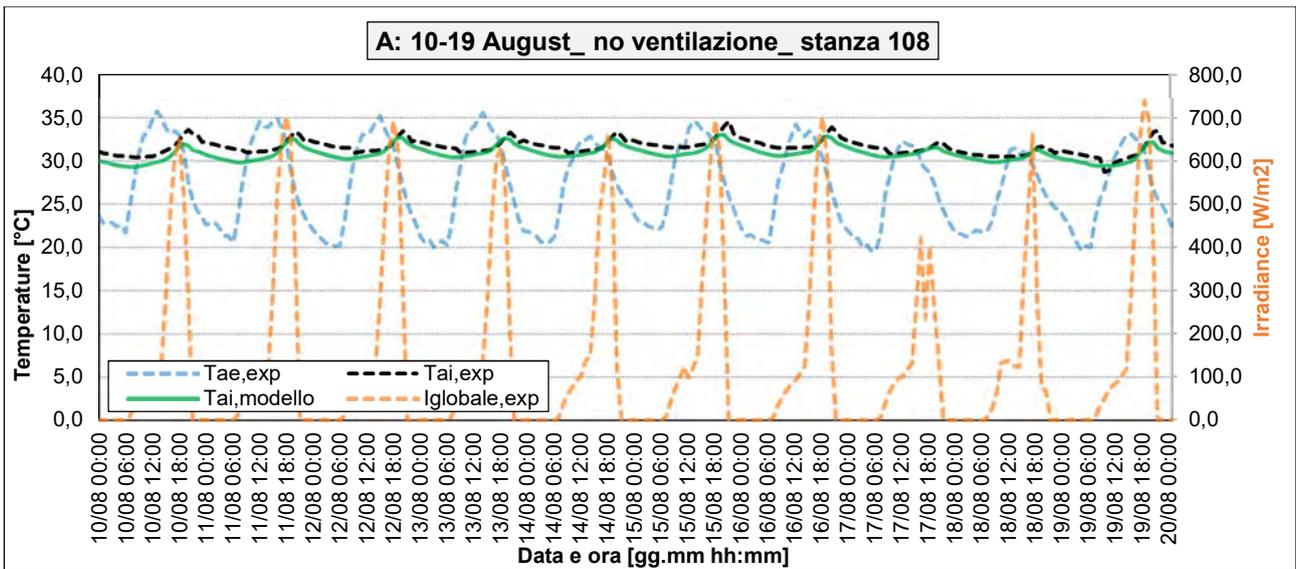


Figura 14: Temperature e Irradianze stanze con DGU\_81/77: A=stanza 108; B= stanza 109; C= stanza 110

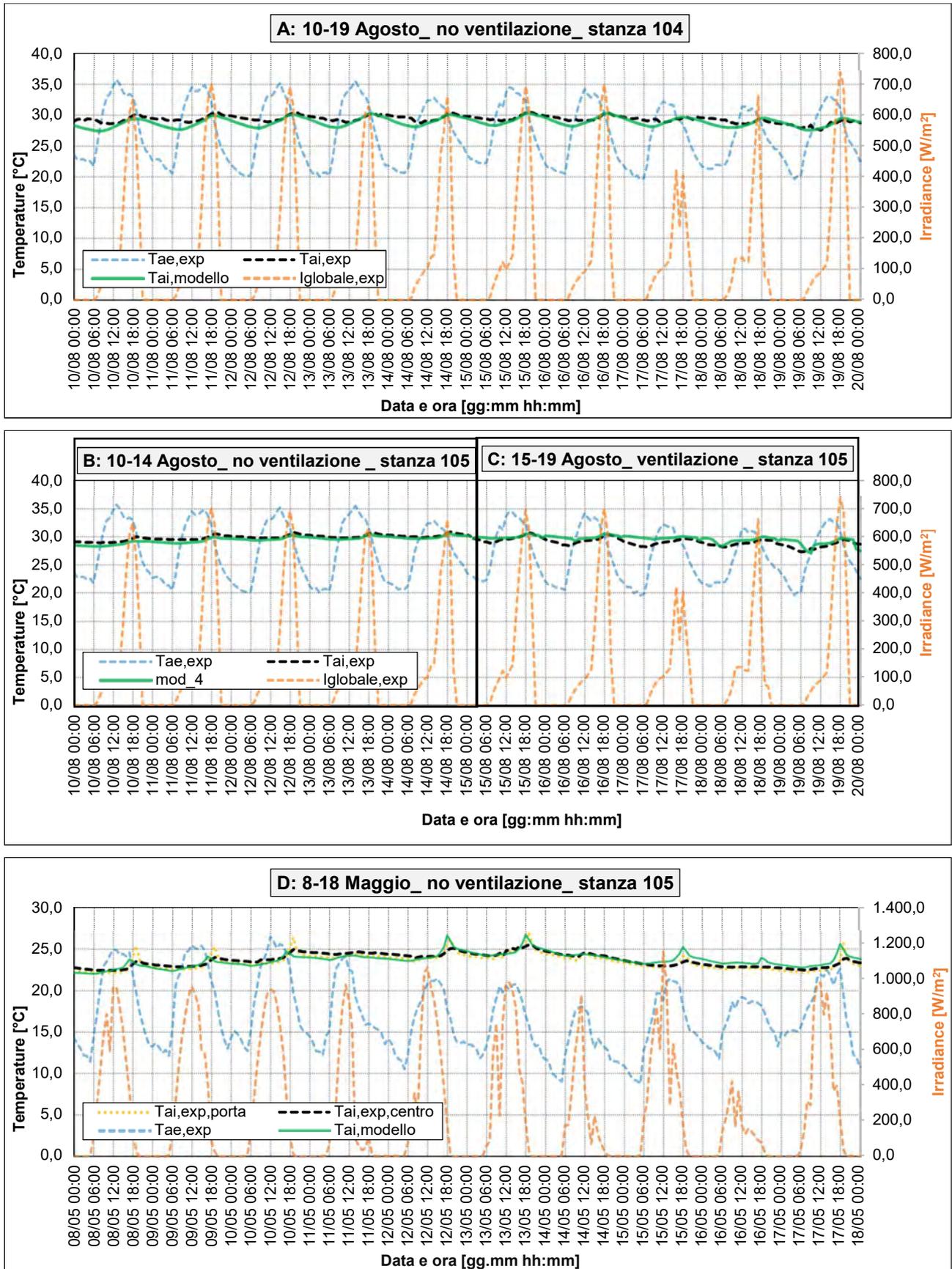


Figura 15: Temperature e Irradianze stanze con DGU\_68/36: A=stanza 104; B e C = stanza 105, agosto; D= stanza 105, maggio

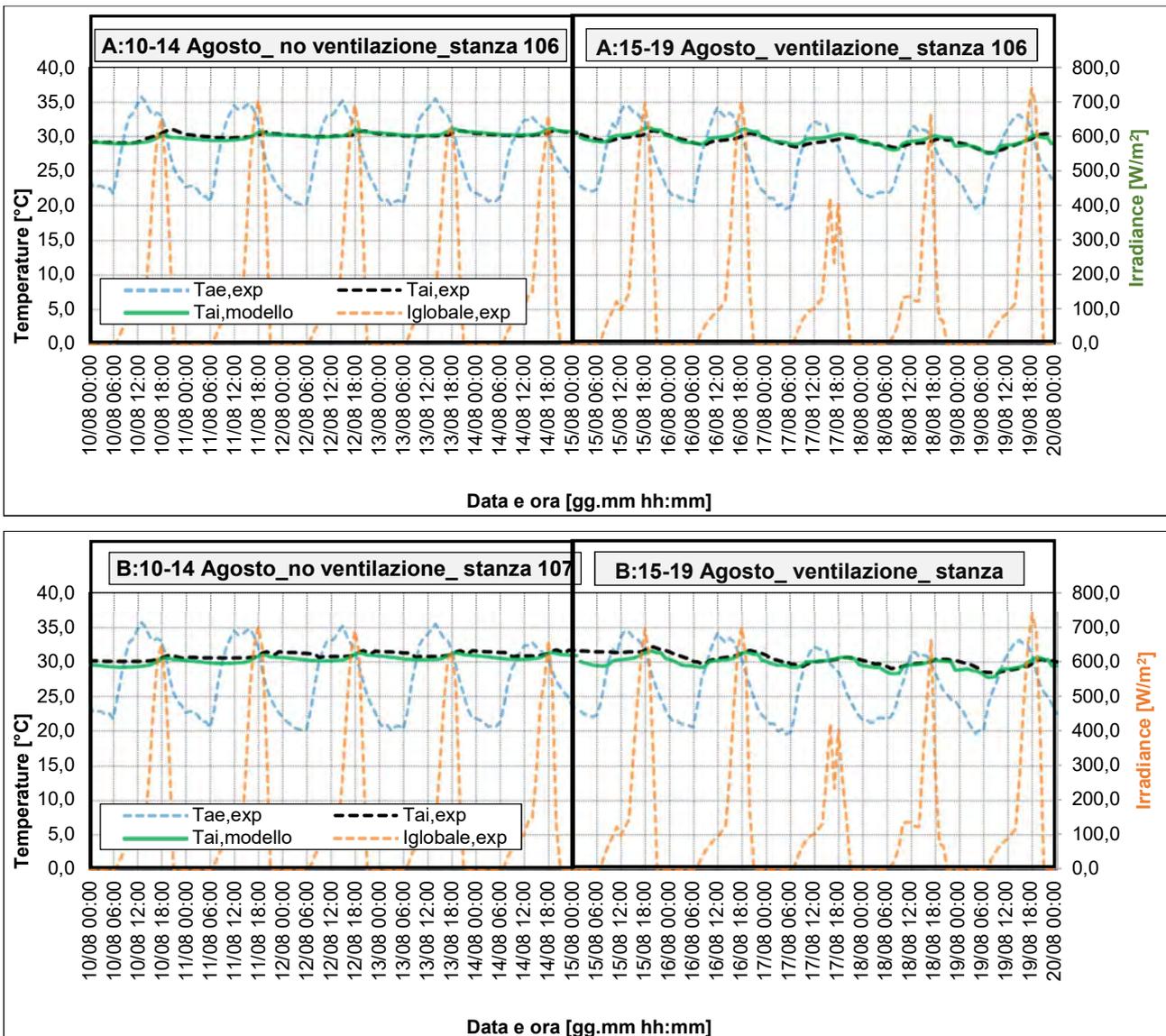


Figura 16: Temperature e Irradianze stanze con TGU\_61/33: A = stanza 106; B = stanza 107

**Tabella 10: Indici statistici di errore periodo agosto**

	room 104	room 105		room 106		room 107	room 108	room 109	LIMITI
	NO VENT	NO VENT	VENT	NO VENT	VENT	NO VENT	NO VENT	NO VENT	
<b>MBE</b>	-1.7%	0.5%	1.9%	0.0%	0.5%	-1.2%	-2.5%	-1.3%	10%
<b>RMSE</b>	0.75	0.47	0.71	0.31	0.01	0.62	0.93	0.60	
<b>CV-RMSE</b>	12.7%	5.4%	8.2%	6.5%	0.3%	10.5%	11.9%	10.5%	30%
<b>P-RMSE</b>	2.6%	1.6%	0.0%	1.1%	0.0%	2.1%	3.0%	1.9%	

**Tabella 11: Indici statistici di errore periodo maggio-giugno**

	room 105		room 110		LIMITI
	105_porta	105_centro	110_porta	110_centro	
<b>MBE</b>	1.1%	0.2%	0.4%	-0.8%	10%
<b>RMSE</b>	0.6	0.5	0.5	1.0	
<b>CV-RMSE</b>	11.7%	16.5%	6.8%	7.8%	30%
<b>P-RMSE</b>	2.4%	2.2%	2.2%	3.5%	

#### 4.3.2 Validazione e calibrazione modello daylight – Radiance

La simulazione della luce naturale, come detto in precedenza, fa uso del modello di calcolo a 5 fasi di Radiance. I parametri di simulazione utilizzati per la costruzione del modello del caso studio, riportati in dettaglio all'interno della descrizione di quest'ultimo, sono frutto di una calibrazione rispetto a dei dati sperimentali. Quest'ultima è stata eseguita con lo scopo di minimizzare le differenze tra i risultati predetti dal modello ed i dati misurati sperimentalmente, riducendo così l'errore commesso all'interno della simulazione.

Le misure sperimentali utilizzate nella calibrazione riguardano illuminamenti ed irradianze sul piano orizzontale, misurate rispettivamente per mezzo di un piranometro e tre luxmetri con range di misura da 0 a 7000 lx. I suddetti sensori sono stati collocati ad un'altezza di 83 cm dal pavimento lungo la linea di mezzeria della finestra a profondità diverse all'interno della stanza. In Figura 13 possibile osservare nel dettaglio il collocamento di questi sensori all'interno dell'ufficio preso in esame. Per ognuno di questi sensori sono stati acquisiti dati ogni minuto per l'intera giornata, in condizioni di cielo sereno, per due configurazioni della veneziana: (i) veneziana completamente alzata; (ii) veneziana completamente abbassata e lamelle poste ad un angolo di 30°. Per la prima configurazione le misure sono state effettuate il 31 luglio 2021, mentre per la seconda configurazione si è presa in esame la giornata dell'11 luglio 2021. In entrambi i giorni, oltre ai dati già citati, sono stati acquisiti anche i valori di irradianza diffusa e globale sul piano orizzontale e di diretta normale, sempre ad un intervallo di 1 minuto, mediante la stazione meteorologica del Centro Ricerche ENEA-Casaccia. Tutti i dati sperimentali sono stati poi mediati ogni cinque minuti al fine di ridurre sia il rumore presente nell'acquisizione sia l'effetto di eventuali inaccurately di misura locali. Del dataset così ottenuto, i dati relativi all'irradianza diretta normale e diffusa sul piano orizzontale sono stati utilizzati come input per il calcolo dei valori di illuminamento ed irradianza negli stessi punti in cui erano stati collocati i luxmetri ed il piranometro. Per la calibrazione si è quindi affrontato un processo iterativo in cui i parametri simulativi venivano di volta in volta corretti al fine di ridurre le differenze tra il dato sperimentale e quello numerico.

La Figura 17 mostra i risultati ottenuti per la calibrazione relativamente al caso con la veneziana completamente alzata. Per quanto riguarda gli illuminamenti è innanzitutto possibile notare come il ridotto range di misura dei luxmetri utilizzati costituisca un ostacolo nel confronto tra dati sperimentali e dati simulati. Infatti, nelle ore pomeridiane, e cioè quando il sole penetra all'interno della stanza, gli illuminamenti

simulati raggiungono valori ben al di sopra dei 7000 lx misurati. Risulta perciò non possibile in questo caso un confronto tra i dati sperimentali e quelli misurati quando l'illuminamento è determinato sia da radiazione diffusa che diretta. Per quanto riguarda invece i momenti in cui i tre sensori non sono colpiti da luce diretta, è possibile notare come l'andamento sia simile tra dati sperimentali e simulati. Tuttavia, per ogni sensore, è possibile osservare come gli illuminamenti misurati, circa un'ora prima che esso venga colpito dalla radiazione diretta, inizino a crescere maggiormente rispetto a quelli simulati. Relativamente alle irradianze invece, l'andamento dei dati simulati risulta molto simile a quello dei dati sperimentali. È tuttavia possibile osservare come il modello sovrastimi leggermente l'irradianza di picco, con una differenza massima di circa  $7 \text{ W/m}^2$ , mentre negli istanti immediatamente precedenti al momento in cui il sensore viene colpito dalla radiazione diretta, i dati simulati siano di poco inferiori a quelli misurati.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti relativamente al caso con veneziana abbassata con le lamelle poste a  $30^\circ$  (cfr. Figura 18), è possibile notare come gli andamenti, sia per gli illuminamenti sia per le irradianze, siano sensibilmente diversi tra dati misurati e simulati. Nello specifico, per gli illuminamenti si nota come l'andamento dei dati simulati si presenti come piuttosto armonico. Fa eccezione a ciò, per i punti B e C, un breve periodo di tempo nel tardo pomeriggio in cui i sensori risultano colpiti da radiazione diretta. Al contrario, i dati misurati presentano un andamento piuttosto piatto per tutta la mattina, con un incremento progressivo abbastanza ripido dalle 13:07 in poi, per poi decrescere altrettanto bruscamente nel tardo pomeriggio. Non si ravvisano inoltre momenti nel tardo pomeriggio in cui i sensori siano colpiti da radiazione solare diretta, come accadeva invece per i sensori B e C nei dati simulati. Confrontando poi gli andamenti tra dati simulati e misurati al mattino gli illuminamenti simulati risultano maggiori di quelli misurati, mentre al pomeriggio questa tendenza si inverte, con differenze che superano i 200 lx per il sensore più vicino alla finestra. Relativamente all'irradianza, il modello di calcolo appare sottostimare la quantità di radiazione che colpisce il sensore durante tutta la giornata. Inoltre, dai dati simulati il sensore risulta irradiato direttamente dalle 17:50 alle 18:30 circa, mentre invece dai dati sperimentali questo risulta sempre ombreggiato. Tuttavia, guardando i valori assoluti delle irradianze sia simulate che misurate ci si accorge come questi siano estremamente bassi, e quindi l'analisi di questi dati per la calibrazione del modello risulta poco significativa.

Le ostruzioni esterne all'edificio considerato sono state quindi modellate basandosi su planimetrie per l'impronta a terra degli edifici e su immagini per le loro altezze, mentre per la vegetazione ad alto fusto è stato possibile effettuare solamente una modellazione di massima. Inoltre, il modello dell'ufficio in esame è stato realizzato considerando solamente gli arredi principali (armadi, scrivanie, ecc..) posti nella posizione indicata dagli utenti. Tuttavia, essendo l'ufficio fruito da utenti reali, la posizione di questi arredi può essere stata modificata, anche minimamente, dagli occupanti. Inoltre, non è stato possibile considerare la presenza di elementi di arredo minori ed altri oggetti come piante, scatole, poster, ed altri ancora che possono significativamente alterare la riflessione della luce ed anche costituire eventuali ombreggiamenti rispetto al modello realizzato. Infine, relativamente alla modellazione, bisogna segnalare che non è stato possibile misurare le proprietà di riflessione delle superfici interne all'ufficio, le quali sono state inizialmente stimate a partire dalle immagini di questi ultimi e poi sono state modificate in sede di calibrazione del modello. Questa serie di incertezze modellistiche può contribuire in maniera significativa nel determinare le differenze osservate tra dati misurati e simulati, in quanto le varie geometrie modellate possono bloccare più o meno luce di quanta effettivamente venga bloccata dalle ostruzioni reali ed anche le superfici interne possono riflettere più o meno radiazione rispetto a quanto considerato nel modello.

Bisogna poi considerare i limiti intrinseci del modello di calcolo utilizzato, e cioè il metodo a cinque fasi di Radiance. Quest'ultimo è infatti uno dei modelli più accurati attualmente disponibili, ma contiene comunque una serie di limitazioni che possono determinare discrepanze anche determinanti tra dati sperimentali e simulate. La limitazione maggiore consiste nel fatto che la posizione del sole, come spiegato in precedenza, viene discretizzata in 5185 posizioni possibili nella volta celeste. A seconda della posizione reale del sole in un dato momento, il modello sceglie quale delle 5185 posizioni disponibili sia la più vicina a quella reale. Tale discrepanza tra la realtà e la simulazione può determinare una quantità di radiazione solare diretta che raggiunge una superficie diversa da quella reale. Inoltre, i parametri di calcolo utilizzati, e specialmente il parametro -ab, che indica il numero di riflessioni da considerare per ogni raggio di luce, possono determinare

una sottostima anche importante della radiazione solare effettivamente presente. Tuttavia, il miglioramento dei parametri di simulazione è direttamente collegato al tempo di computazione necessario per terminare la simulazione, per cui parametri più performanti avrebbero richiesto un tempo di calcolo troppo alto per le finalità di questo studio.

Si conclude quindi che, alla luce delle limitazioni relative al modello di calcolo ed alla mancanza di alcuni dati di input, che sono quindi stati stimati in maniera indiretta, la calibrazione del modello non può essere ulteriormente affinata e quindi si ritiene di poter utilizzare il modello di daylight calibrato, nonostante le inaccurately rilevate.

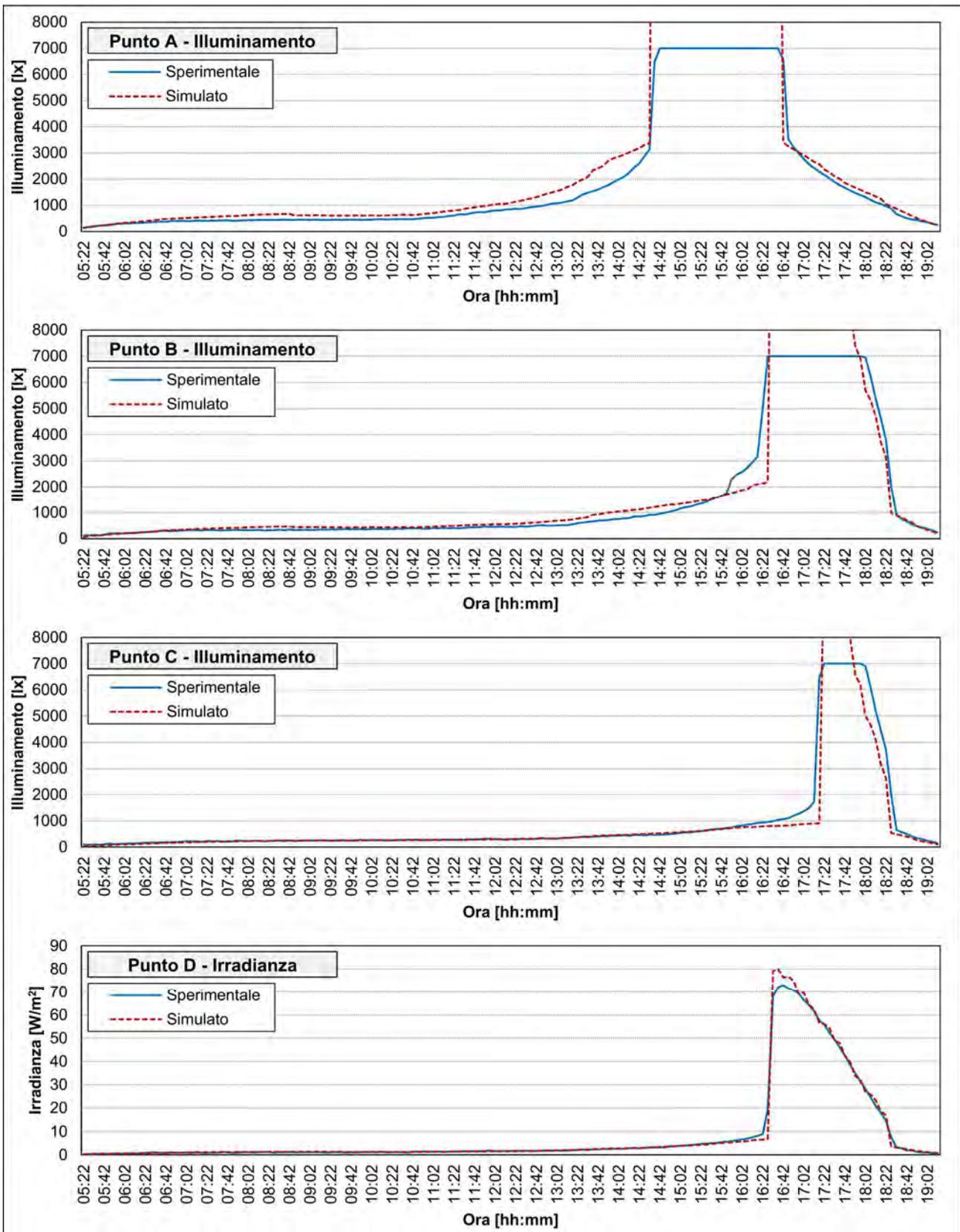


Figura 17. Risultato della calibrazione per il caso con veneziana completamente alzata.

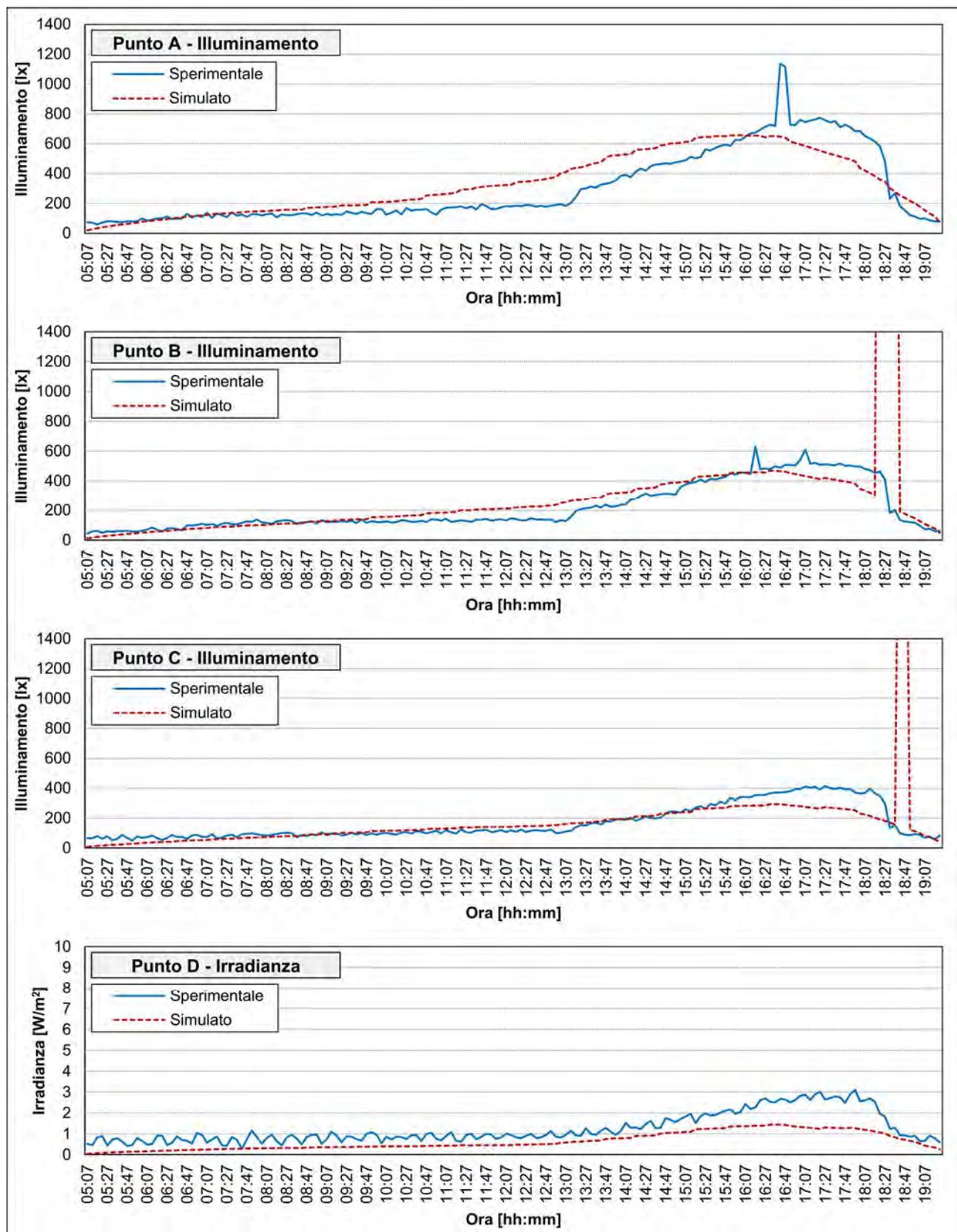


Figura 18. Risultato della calibrazione per il caso con veneziana abbassata e lamelle ruotate a 30°.

Le differenze osservate tra dati sperimentali e simulati per i due casi analizzati possono essere spiegate considerando i diversi limiti dell'approccio simulativo utilizzato. Bisogna innanzitutto considerare le incertezze relative al modello geometrico, per il quale non è stato possibile reperire dati precisi.

#### 4.4 Strategie di controllo degli elementi dinamici di involucro

Per la movimentazione della veneziana e l'apertura della finestra sono state considerate diverse strategie di controllo. A seconda dell'ambito sono state considerate strategie che spaziano da semplici strategie Rule-based a complesse strategie mono- e multi-obiettivo basate su modelli di calcolo. Sono state considerate nello specifico:

- Strategie con controlli open-loop – es: sensori di temperatura esterni, posizione solare e schedule oraria;
- Strategie con controlli closed-loop – es: sensori di temperatura, rilevamento CO<sub>2</sub> o illuminamento orizzontale interni;
- Strategie che implicano la presenza di un modello di calcolo – es: ricambi d'aria interni, grado di abbagliamento, temperatura operativa e funzioni di costo.

##### 4.4.1 Controllo della ventilazione naturale

Per il controllo della ventilazione naturale sono state sviluppate diverse strategie di controllo mono- e multi-obiettivo, le quali sono state confrontate con due strategie di riferimento selezionate da letteratura, un caso ideale con la presenza di ventilazione meccanica e il caso con assenza di ventilazione. Lo sviluppo delle diverse strategie analizzate, volto a ottimizzare la prestazione nei diversi ambiti considerati, ha seguito il percorso concettuale identificato in Figura 19, con l'obiettivo di ottimizzare la prestazione energetica massimizzando allo stesso tempo la qualità dell'aria interna. Per l'ottimizzazione della prestazione energetica sono state individuate delle soglie di temperatura esterna in base alle quali aprire la finestra, in modo da non incrementare i carichi energetici; per la massimizzazione dell'IAQ viene prevista l'apertura della finestra in base al numero di ricambi orari di aria e al livello di CO<sub>2</sub> interna. In Tabella 12 sono invece riassunti i parametri di controllo utilizzati nelle strategie considerate.

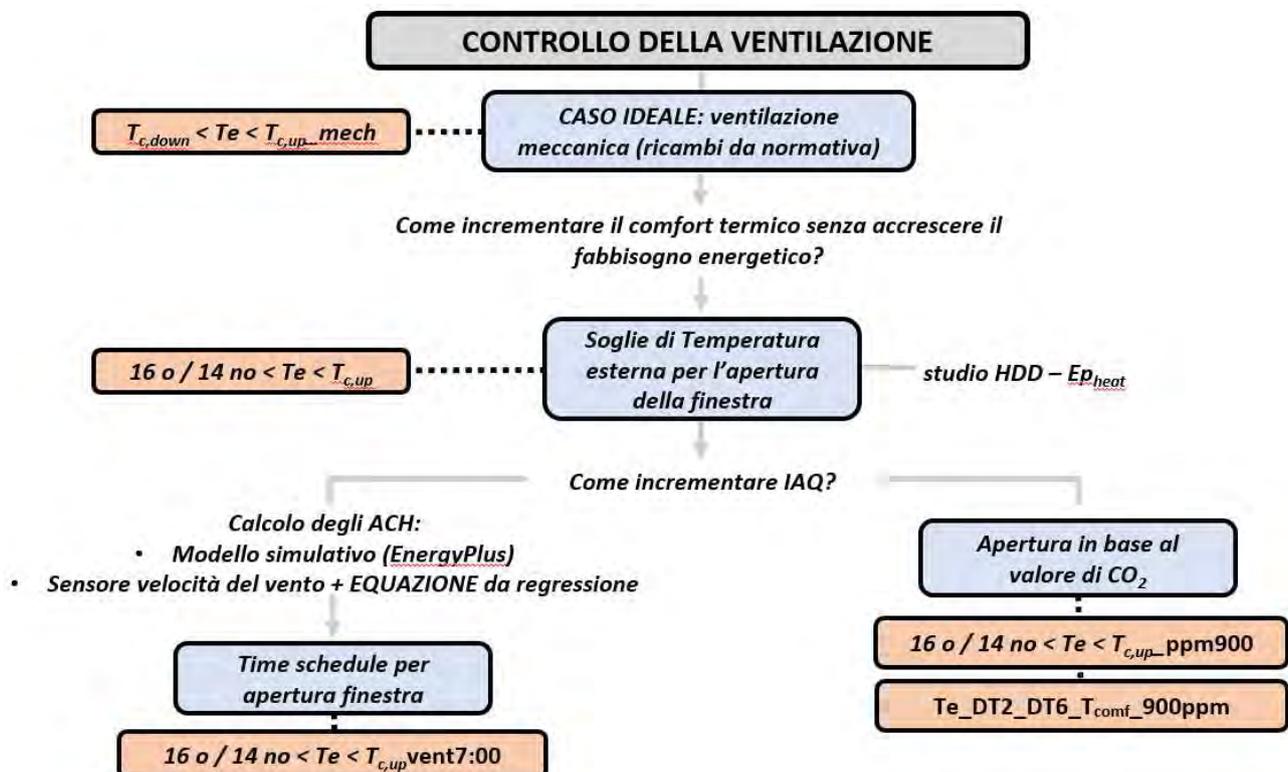


Figura 19: Schema di sviluppo delle strategie di ventilazione

Vengono di seguito descritte le strategie di controllo di riferimento:

- **Novent:** assenza di ventilazione naturale e meccanica;
- **Bench\_mech** ( $T_{op,l} < T_e < T_{op,u\_mech}$ ): riferimento con ventilazione meccanica. Viene modellato un impianto di ventilazione che garantisce una portata d'aria di rinnovo pari ai valori definiti da normativa [16798] per la categoria di comfort considerata, pari a  $0.0007 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$  per i ricambi legati all'edificio e  $0.007 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{persona}$  per i ricambi legati agli utenti presenti in ambiente. L'aria in entrata viene trattata con un recuperatore di calore con efficienza al 75%.
- **Ref\_Te** ( $Liu\_T_i > 23; 12 < T_e < T_i$ ): riferimento basato sulle temperature interna ed esterna. In presenza di occupanti la finestra viene aperta quando la temperatura interna supera i  $23^\circ\text{C}$  e allo stesso tempo la temperatura esterna si trova tra i  $12^\circ\text{C}$  e la temperatura interna. In assenza di occupanti la finestra viene aperta se la media di temperatura interna misurata tra le 12:00 e le 17:00 del giorno precedente è maggiore di  $21^\circ\text{C}$  e la temperatura esterna è minore della temperatura interna. Se la temperatura interna diminuisce sotto la soglia di  $14^\circ\text{C}$  la finestra viene chiusa [97]. Questo tipo di controllo non tiene in conto direttamente della qualità dell'aria interna.
- **Ref\_CO<sub>2</sub>** (Scheu\_900ppm\_  $T_i > 23$   $T_e < T_i - 3$ ): in questo riferimento vengono utilizzati parametri che consentono un controllo diretto sulla qualità dell'aria. Se il valore di CO<sub>2</sub> supera i 900 ppm la finestra viene aperta, e finché esso non scende al di sotto di 800 ppm. Inoltre, se la temperatura interna è maggiore di  $23^\circ\text{C}$  e la temperatura esterna inferiore di almeno  $3^\circ\text{C}$  rispetto a quella interna viene aperta la finestra. In presenza di occupanti essa viene richiusa quando la temperatura operativa  $T_{op}$  calcolata scende al di sotto di  $22^\circ\text{C}$ . In assenza di occupanti invece la finestra viene chiusa quando  $T_{op}$  è minore di  $18^\circ\text{C}$  [98].

Segue la descrizione dettagliata delle strategie di controllo oggetto di sviluppo:

- **Opt\_Te** ( $16o/14no < T_e < T_{op,u}$ ): strategia open-loop semplice con controllo basato su soglie di temperatura esterna ottimizzate affinché le dispersioni di calore siano compensate dagli apporti energetici interni. In presenza di occupanti la finestra viene aperta se la temperatura esterna si trova nell'intervallo compreso tra  $16^\circ\text{C}$  e la temperatura limite superiore di comfort  $T_{op,u}$ , calcolata come descritto nella sezione 4.2.2. In assenza di occupanti la finestra viene aperta se la temperatura esterna si trova nell'intervallo compreso tra  $14^\circ\text{C}$  e la temperatura limite superiore di comfort  $T_{op,u}$ . Tali soglie di temperature sono ricavate dallo studio della correlazione tra gradi giorno (Heating Degree Days – HDD e Cooling Degree Days - CDD) per il clima di Roma e l'energia di riscaldamento e raffrescamento richiesta all'impianto. Calcolando il 99esimo percentile della richiesta di riscaldamento e raffrescamento in un ambiente costantemente ventilato naturalmente e identificando il corrispondente valore in HDD e CDD viene identificata la differenza tra temperatura interna ed esterna per cui la richiesta di climatizzazione è trascurabile in presenza di ventilazione naturale. Questo vuol dire che aprendo le finestre quando tale differenza è al di sotto del valore calcolato non sarà incrementato il fabbisogno di climatizzazione interno. Sono state considerate come soglie  $20^\circ\text{C}$  (inverno) e  $26^\circ\text{C}$  (estate) in presenza di occupazione e  $12^\circ\text{C}$  (inverno) e  $30^\circ\text{C}$  (estate) in assenza di occupazione.
- **Opt\_ACH\_hh** ( $16o/14no < T_e < T_{op,u\_vent7:00}$ ): in questa strategia si introduce il controllo sulla qualità dell'aria interna mediante un'equazione di calcolo dei ricambi di aria interna. La finestra viene aperta quando la temperatura esterna si trova tra  $16^\circ\text{C}$  e il limite  $T_{op,u}$  con ufficio occupato, e tra  $14^\circ\text{C}$  e il limite  $T_{op,u}$  con ufficio non occupato. Ogni volta che la finestra viene aperta vengono conteggiati i ricambi d'aria in base a un'equazione ricavata dalla correlazione tra velocità del vento e percentuale di apertura della finestra. In un caso reale tale procedimento permette di calcolare i ricambi orari senza l'ausilio di un software e modello specifico, bensì grazie ai dati dei sensori presenti in campo. Nel caso corrente il calcolo viene effettuato dal software EnergyPlus. Se i ricambi orari non siano bastanti a soddisfare il limite da normativa la finestra viene aperta finché il requisito giornaliero (in questo caso pari a 14 ACH giornalieri) non venga soddisfatto. Sono state studiate diverse schedule

orarie di apertura della finestra secondo questa regola: a valle dei risultati è stata selezionata quella maggiormente performante a livello di IAQ, ovvero il caso in cui la finestra viene aperta dalle 7:00.

- **Opt\_T<sub>e</sub>\_CO<sub>2</sub>** (16o/14no<T<sub>e</sub><T<sub>op,u</sub>\_900ppm): per una verifica maggiormente dettagliata della qualità dell'aria interna è necessario introdurre la misurazione del livello di CO<sub>2</sub>. Nella strategia corrente la finestra viene aperta quando la temperatura esterna si trova tra 16°C e il limite T<sub>op,u</sub> con ufficio occupato, e tra 14°C e il limite T<sub>op,u</sub> con ufficio non occupato; in aggiunta essa viene aperta ogni volta in cui viene superata la soglia di CO<sub>2</sub> pari a 900 ppm.
- **Opt\_ΔT\_CO<sub>2</sub>** (T<sub>e</sub>\_DT2\_DT6\_T<sub>op,opt</sub>\_900ppm): la finestra viene aperta ogni volta in cui viene superata la soglia di CO<sub>2</sub> pari a 900 ppm. Inoltre, se la media di temperatura interna giornaliera del giorno precedente (T<sub>av,n-1</sub>) si trova sopra la T<sub>op,opt</sub> viene aperta la finestra quando la temperatura esterna misurata è compresa tra T<sub>op,u</sub> e T<sub>op,u</sub> - 6°C; se invece T<sub>av,n-1</sub> è minore di T<sub>op,opt</sub>, la finestra viene aperta quando la temperatura esterna misurata è compresa tra T<sub>op,u</sub> e T<sub>op,u</sub> - 2 °C. Tale suddivisione differenzia il range di apertura in base alla stagione. Il restringimento della soglia di temperatura esterna che determina l'apertura non influisce negativamente sulla qualità dell'aria interna poiché affiancato a un controllo sulla CO<sub>2</sub>.

**Tabella 12: Strategie di controllo della ventilazione utilizzate e relativi parametri**

Tipologia	Strategia di controllo	ID STRATEGIA	Modello	Schedule	Sensori esterni		Sensori interni		
				Ora	T <sub>e</sub>	Velocità del vento	T <sub>i</sub>	T <sub>op</sub>	CO <sub>2</sub>
Benchmark	NoVent	NoVent	/	-	-	-	-	-	-
	T <sub>op,i</sub> <T <sub>e</sub> <T <sub>op,u</sub> _mech	Bench_mech	RBC	-	X	-	-	-	-
Riferimenti	Liu_T <sub>i</sub> >23;12<T <sub>e</sub> <T <sub>i</sub>	Ref_T <sub>e</sub>	RBC	-	X	-	X	-	-
	scheuring_900ppm_T <sub>i</sub> >23_T <sub>e</sub> <T <sub>i</sub> -3 °C	Ref_CO <sub>2</sub>	MBC	-	X	-	X	X	X
Strategie sviluppate	16o/14no<T <sub>e</sub> <T <sub>op,u</sub>	Opt_T <sub>e</sub>	RBC	-	X	-	-	-	-
	16o/14no<T <sub>e</sub> <T <sub>op,u</sub> _vent7:00	Opt_ACH_hh	MBC	X	X	X	-	-	-
	16o/14no<T <sub>e</sub> <T <sub>op,u</sub> _900ppm	Opt_T <sub>e</sub> _CO <sub>2</sub>	MBC	-	X	-	-	-	X
	Te_DT2_DT6_T <sub>op,comfort</sub> _900ppm	Opt_ΔT_CO <sub>2</sub>	MBC	-	X	-	-	-	X

#### 4.4.2 Controlli schermature solari

Per le schermature mobili sono state valutate diverse strategie di controllo MBC mono- e multi-obiettivo, le quali sono state confrontate con due strategie di riferimento RBC. Queste ultime sono nello specifico:

- **NoBlinds:** assenza di qualsiasi schermatura mobile;
- **CutOff:** le lamelle delle veneziane sono orientate secondo l'angolo di cut-off, e cioè l'angolo minore (a 0° le lamelle sono orizzontali) per il quale la radiazione solare diretta non penetra in ambiente. Questa strategia è comunemente utilizzata per impedire che la radiazione solare diretta colpisca l'occupante, in quanto ciò potrebbe determinare sia un rischio di abbagliamento, sia un possibile discomfort termico[99]. Le veneziane vengono controllate ogni qualvolta lo sky clearness index, cioè un parametro di misura della limpidezza del cielo[100], sia al di sopra di 1.2 (1: cielo coperto; 6: cielo sereno).

Le diverse strategie di controllo MBC mono- e multi-obiettivo analizzate in questo studio possono essere espresse tramite la seguente formula di carattere generale (equazione di costo):

$$stato\ veneziane = \min(10^{2\cdot\alpha} \cdot f_{DGP} + 10^{2\cdot\beta} \cdot f_{EWP} + 10^{2\cdot\gamma} \cdot f_{TOP} + 10^{2\cdot\delta} \cdot f_{view-out}) \quad (4.15)$$

In cui  $f_{DGP}$ ,  $f_{EWP}$ ,  $f_{TOP}$ ,  $f_{view-out}$ , sono fattori, nell'intervallo 0-1, che esprimono la prestazione di ciascuno stato delle veneziane relativamente a, nell'ordine, abbagliamento, illuminamento del piano di lavoro, comfort

termico e vista verso l'esterno. Nel dettaglio, il fattore  $f_{Ewp}$  rappresenta la frazione di sensori sul piano di lavoro per i quali l'illuminamento sia all'interno del range 300 lx – 3000 lx, mentre il fattore  $f_{view-out}$  tiene in considerazione la vista verso l'esterno consentita da ciascuno stato delle veneziane rispetto al relativo angolo delle lamelle (0: veneziana assente – 1: angolo delle lamelle di 75°). Gli altri fattori sono invece calcolati nella maniera seguente:

$$f_{DGP} = \begin{cases} 0.0, & DGP < 0.40 \\ 0.5, & 0.40 \leq DGP < 0.45 \\ 1.0, & DGP \geq 0.45 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$f_{Top} = \begin{cases} 0.0, & T_{op,l cat II} \leq T_{op} \leq T_{op,u cat II} \\ 0.5, & T_{op,l cat III} \leq T_{op} \leq T_{op,u cat III} \\ 1.0, & T_{op} > T_{op,u cat III} \vee T_{op} < T_{op,l cat III} \end{cases} \quad (4.17)$$

In cui i pedici *cat II* e *cat III* si riferiscono alle categorie per il comfort termico definite in [79].

I coefficienti esponenziali  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , che possono variare da 0 a 3 a seconda della strategia di controllo, indicano la priorità di ciascuno dei fattori  $f$  sopracitati. Di conseguenza, variando questi coefficienti è possibile stabilire la priorità di ciascun fattore  $f$ , e quindi dello specifico aspetto che esso considera, nella definizione dello stato ottimale della veneziana. Perché un determinato fattore  $f$  sia escluso dall'equazione di costo, il suo coefficiente esponenziale deve essere posto pari a  $-\infty$ . In questo studio, durante le ore di occupazione è stato considerato come stato ottimale delle veneziane quello per cui venisse minimizzato il risultato dell'equazione di costo; nelle ore non occupare invece, le veneziane sono state poste a 75° durante tutte quelle ore di luce diurna in cui la temperatura dell'aria nell'ambiente fosse superiore a 23 °C (ciò vale anche per la strategia di CutOff). In questo studio sono state analizzate le seguenti strategie di controllo, ciascuna ottenuta variando i coefficienti esponenziali dell'equazione di costo e mirata ad ottimizzare un singolo aspetto di comfort, oppure una combinazione di più di uno di questi (cfr. Tabella 13):

- **Opt\_DGP:** viene utilizzato lo stato della veneziana più aperto per il quale il valore di DGP risulta inferiore a 0.4;
- **Opt\_Ewp:** viene utilizzato lo stato della veneziana più aperto in grado di massimizzare il numero di sensori sul piano di lavoro il cui illuminamento risulta all'interno del range 300 lx – 3000 lx. È stata utilizzata una soglia inferiore del range di illuminamento utile pari a 300 lx, invece della soglia tipica di 100 lx, in modo da uniformare questo requisito con il requisito minimo di illuminamento sul piano di lavoro stabilito da [101];
- **Opt\_Top:** viene utilizzato lo stato della veneziana più aperto per il quale il valore di temperatura operativa risulta all'interno del range di comfort. Gli stati della veneziana disponibili sono limitati a quelli il cui angolo della lamella sia inferiore all'angolo di cut-off;
- **Opt\_Mlt<sub>A</sub>:** tra gli stati della veneziana per cui il valore di DGP risulta inferiore a 0.4 viene scelto lo stato più aperto per cui la temperatura operativa risulti all'interno del range di comfort;
- **Opt\_Mlt<sub>B</sub>:** tra gli stati della veneziana per cui il valore di temperatura operativa risulta all'interno del range di comfort viene scelto quello più aperto per cui il valore di DGP risulti inferiore a 0.4;
- **Opt\_Mlt<sub>C</sub>:** viene scelto lo stato della veneziana più aperto in grado di minimizzare contemporaneamente il discomfort termico ed il livello di abbagliamento;
- **Opt\_Mlt<sub>D</sub>:** tra gli stati della veneziana in grado di massimizzare il numero di sensori sul piano di lavoro il cui illuminamento risulta all'interno del range 300 lx – 3000 lx viene scelto quello più aperto per cui il valore di DGP risulti inferiore a 0.4 ed il valore di temperatura operativa risulti all'interno del range di comfort;
- **Opt\_Mlt<sub>E</sub>:** viene scelto lo stato della veneziana più aperto in grado di minimizzare contemporaneamente il discomfort termico ed il livello di abbagliamento, e di massimizzare il numero di sensori sul piano di lavoro il cui illuminamento risulti all'interno del range 300 lx - 3000 lx.

**Tabella 13. strategie di controllo considerate e relativi coefficienti esponenziali**

Tipologia	Strategia di controllo	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Benchmark (RBC)	NoBlinds	-	-	-	-
	CutOff	-	-	-	-
Mono-obiettivo (MBC)	Opt_DGP	1	$-\infty$	$-\infty$	0
	Opt_E <sub>wp</sub>	$-\infty$	1	$-\infty$	0
	Opt_T <sub>op</sub>	$-\infty$	$-\infty$	1	0
Multi-obiettivo (MBC)	Opt_Mlt <sub>A</sub>	2	$-\infty$	1	0
	Opt_Mlt <sub>B</sub>	1	$-\infty$	2	0
	Opt_Mlt <sub>C</sub>	1	$-\infty$	1	0
	Opt_Mlt <sub>D</sub>	2	3	1	0
	Opt_Mlt <sub>E</sub>	1	1	1	0

#### 4.4.3 Matrice finale dei controlli a confronto

L'applicazione delle strategie sui due diversi attuatori (apertura delle finestre e controllo delle veneziane) crea un ventaglio di possibilità di simulazione descritto nella matrice in Tabella 14 e Tabella 15.

La prestazione delle diverse strategie considerate viene confrontata con i riferimenti identificati da letteratura e valutata in due differenti condizioni impiantistiche:

- Set A: presenza del solo impianto di heating (cfr. Tabella 14). Tale indagine permette di verificare come il controllo dei componenti adattivi influisca sul fabbisogno energetico invernale e sul comfort termico annuale. In particolare, è possibile studiare come il controllo delle veneziane e della ventilazione naturale mitighi il discomfort per radiazione diretta e surriscaldamento interno estivo.
- Set B: presenza dell'impianto di heating e di cooling (cfr. Tabella 15). Tale indagine permette di identificare la variazione di fabbisogno energetico per riscaldamento e condizionamento estivo su tutto l'anno, e la variazione dei carichi elettrici di picco richiesti alla rete annualmente, oltre che alla prestazione relativa al comfort termico.

Osservando la matrice delle simulazioni in Tabella 14 e Tabella 15 è possibile leggere in colonna le strategie applicate alle veneziane, mentre nelle righe le strategie applicate alla ventilazione. Viene simulata la matrice completa per il set A, con presenza del solo impianto di riscaldamento; per il set B vengono simulati solo: (i) i casi limite per il controllo delle veneziane (NoBlinds e Cutoff); (ii) i casi limite (benchmark di riferimento) per il controllo della ventilazione (RBC ottimizzata sulle temperature interne,  $Opt_{Te}$ , e RBC ottimizzata per comfort degli occupanti,  $Opt_{\Delta T_{CO2}}$ ).

Sulla prima riga e sulla seconda colonna della matrice è possibile leggere l'ambito di comfort per cui viene ottimizzata ogni strategia. Le strategie possono essere progettate per massimizzare il Comfort Termico (TC) mediante un controllo sulle temperature o sulla radiazione diretta, il Comfort Visivo (VC) mediante un controllo sugli illuminamenti e sull'abbagliamento, o la Qualità dell'Aria Interna (IAQ) mediante il controllo dei ricambi orari o dei valori di CO<sub>2</sub> interni. Sulla seconda riga e sulla terza colonna della matrice si leggono il tipo di modello e gli input utilizzati nel processo decisionale. Le strategie possono essere Rule Based (RB) o Model Based (MB); esse possono inoltre utilizzare input climatici per il controllo (cl.i.), come nel caso delle strategie open-loop basate sulle temperature esterne, input esterni (e.i) normalmente non forniti da dati meteo (come la velocità del vento in facciata) o input interni (i.i), in tutti i casi in cui vengono utilizzati valori di parametri misurati internamente alla stanza ( $T_i$ ,  $T_{op}$ , CO<sub>2</sub>).

**Tabella 14: Matrice delle strategie Set A**

		Controllo della veneziana												
Obiettivo	Modello e input	Nome			VC		TC	VC & TC						
			Rif	RB / cl.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	multi-obiettivo						
			NoBlinds	CutOff	Opt_DGP	Opt_Ewp	Opt_Top	Opt_MltA	Opt_MltB	Opt_MltC	Opt_MltD	Opt_MltE		
Controllo della ventilazione	-	-	NoVent	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC + IAQ	RB / cl.i.	Bench_mech	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC	RB / cl.i.	Ref_Te	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC + IAQ	MB / i.i.	Ref_CO2	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC	RB / cl.i.	Opt_Te	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-
			Opt_ACH_hh	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-
			Opt_Te_CO2	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-
TC + IAQ	MB / i.i.	Opt_ΔT_CO2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		

**Tabella 15: Matrice delle strategie Set B**

		Controllo della veneziana											
Obiettivo	Modello e input	Nome			VC		TC	VC & TC					
			Rif	RB / cl.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	multi-objective					
			NoBlinds	CutOff	Opt_DGP	Opt_Ewp	Opt_Top	Opt_MltA	Opt_MltB	Opt_MltC	Opt_MltD	Opt_MltE	
Controllo della ventilazione	TC + IAQ	RB / cl.i.	Bench_mech	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC	RB / cl.i.	Ref_Te	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC + IAQ	MB / i.i.	Ref_CO2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC	RB / cl.i.	Opt_Te	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC + IAQ	MB / i.i.	Opt_ΔT_CO2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-

LEGENDA					
<b>RB</b>	Rule based control	<b>cl.i</b>	input climatici	<b>TC</b>	Comfort Termico
<b>MB</b>	Model based control	<b>e.i.</b>	input esterni	<b>IAQ</b>	Qualità dell'aria interna
		<b>i.i.</b>	input interni	<b>VC</b>	Comfort Visivo

## 4.5 Risultati

L'obiettivo dell'indagine è identificare la strategia che consente di ottimizzare la prestazione del componente trasparente adattivo in ogni dominio al minor costo energetico. I differenti domini che vengono influenzati da ogni strategia di controllo rendono necessaria una discretizzazione del problema per un'indagine chiara dei risultati. Di conseguenza verranno di seguito presentati diversi approfondimenti analizzando trasversalmente la matrice delle strategie di controllo, come presentato in Tabella 16, e riguardanti in particolare:

- 1) Risultati dipendenti dal controllo della ventilazione, mantenendo lo stesso stato della veneziana (colonna evidenziata in giallo in Tabella 17 e Tabella 18 – Paragrafo 4.5.1.1 set A; paragrafo 4.5.2.1 set B);
- 2) Indagine sull'ottimizzazione delle prestazioni in base alla costruzione del controllo per il caso delle strategie di ventilazione (colonna evidenziata in giallo in Tabella 17 e Tabella 18 – Paragrafo 4.5.1.2);
- 3) Risultati dipendenti dal controllo della veneziana, mantenendo lo stesso tipo di ventilazione (riga segnata con riquadro rosso in Tabella 17 e Tabella 18 – Paragrafo 4.5.1.3 set A; paragrafo 4.5.2.2 set B);
- 4) Focus sulle strategie di controllo della veneziana basate sulla funzione di costo (celle evidenziate in blu in Tabella 17 - Paragrafo 4.5.1.4);
- 5) Focus sugli indici influenzati da entrambi gli attuatori:  $EP_{global}$  e  $T_{op,discomfort}$  (Paragrafo 4.5.1.5 set A; paragrafo 4.5.2.3 set B).

Come riferimento sull'efficacia della prestazione analizzata si considera un limite di discomfort annuale del 5% calcolato sulle ore di occupazione dell'ufficio, come da normativa [79].

**Tabella 16: Legenda analisi effettuate sulla matrice e sezione di riferimento**

LEGENDA MATRICE SIMULAZIONI		Sezione
	Analisi dell'influenza della ventilazione mantenendo lo stesso controllo delle veneziane	<b>4.5.1.1, 4.5.1.2, 4.5.2.1</b>
	Analisi dell'influenza delle veneziane mantenendo lo stesso controllo sulla ventilazione	<b>4.5.1.3, 4.5.2.2</b>
	Analisi della prestazione delle strategie di controllo delle veneziane basate su una funzione di costo	<b>4.5.1.4</b>

Tabella 17: Matrice delle simulazioni con evidenziazione analisi – set A

				Controllo della veneziana										
Obiettivo	Modello e input	Nome			VC		TC	VC & TC						
			Rif	RB / cl.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	multi-obiettivo						
			NoBlinds	CutOff	Opt_DGP	Opt_Ewp	Opt_Top	Opt_MltA	Opt_MltB	Opt_MltC	Opt_MltD	Opt_MltE		
Controllo della ventilazione	-	-	NoVent	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC + IAQ	RB / cl.i.	Bench_mech	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC	RB / cl.i.	Ref_Te	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC + IAQ	MB / i.i.	Ref_CO2	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
	TC	RB / cl.i.	Opt_Te	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
		MB / e.i.	Opt_ACH_hh	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	
		TC + IAQ	MB / i.i.	Opt_Te_CO2	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-
			MB / i.i.	Opt_ΔT_CO2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabella 18: Matrice delle simulazioni con evidenziazione analisi – set B

				Controllo della veneziana									
Obiettivo	Modello e input	Nome			VC		TC	VC & TC					
			Rif	RB / cl.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	MB / i.i.	multi-objective					
			NoBlinds	CutOff	Opt_DGP	Opt_Ewp	Opt_Top	Opt_MltA	Opt_MltB	Opt_MltC	Opt_MltD	Opt_MltE	
Controllo della ventilazione	TC + IAQ	RB / cl.i.	Bench_mech	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC	RB / cl.i.	Ref_Te	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC + IAQ	MB / i.i.	Ref_CO2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC	RB / cl.i.	Opt_Te	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
	TC + IAQ	MB / i.i.	Opt_ΔT_CO2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 4.5.1 Risultati dello scenario A di simulazioni (impianto di riscaldamento)

In questa sezione sono presentati i risultati delle strategie del set A della matrice di simulazioni presentata in Tabella 19. Il codice colori con cui è presentata la matrice indica il grado di discomfort o di fabbisogno energetico per ogni indice; una colorazione più intensa corrisponde a un grado di discomfort più alto o a un fabbisogno energetico più alto. Il rosso è associato agli indici di comfort, mentre il giallo agli indici energetici. In grassetto blu sono evidenziati i casi in cui la simulazione restituisce valori di discomfort al di sotto della soglia del 5%, tranne nei casi degli indici  $UDI_{discomfort}$  e  $CO_{2,discomfort}$ , per i quali, non essendoci alcun caso in cui tale soglia viene rispettata, è stata assunta la soglia del 10% come riferimento.

Tabella 19: Risultati matrice delle simulazioni – Set A

Strategia di controllo	DGP <sub>discomfort</sub>	UDI <sub>discomfort</sub>	T <sub>op,discomfort</sub>	CO <sub>2,discomfort</sub>	ACH <sub>unsatisfied</sub>	EP <sub>heating</sub>	EP <sub>lighting</sub>	EP <sub>global</sub>	P <sub>p,heating</sub>
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[W]
NoVent_NoBlinds	6%	18%	59%	100%	100%	1.33	9.15	10.5	6.0
NoVent_CutOff	1%	11%	55%	100%	100%	1.33	10.23	11.6	6.2
NoVent_Opt_Top	2%	10%	55%	100%	100%	1.34	10.18	11.5	6.0
NoVent_Opt_Ewp	2%	8%	56%	100%	100%	1.34	9.15	10.5	6.4
NoVent_Opt_DGP	0%	17%	57%	100%	100%	1.33	9.49	10.8	6.2
NoVent_Opt_MltA	0%	16%	55%	100%	100%	1.33	9.58	10.9	6.2
Bench_mech_NoBlinds	6%	18%	14%	0%	0%	4.23	9.15	13.4	263.1
Bench_mech_CutOff	1%	11%	11%	0%	0%	4.24	10.23	14.5	264.2
Bench_mech_Opt_Top	2%	10%	10%	0%	0%	4.24	9.95	14.2	263.6
Bench_mech_Opt_Ewp	2%	8%	11%	0%	0%	4.26	9.15	13.4	264.5
Bench_mech_Opt_DGP	0%	17%	12%	0%	0%	4.23	9.49	13.7	263.7
Bench_mech_Opt_MltA	0%	16%	10%	0%	0%	4.28	9.69	14.0	264.1
Ref_Te_NoBlinds	6%	18%	9%	53%	21%	9.33	9.15	18.5	503.9
Ref_Te_CutOff	1%	11%	6%	53%	21%	9.33	10.23	19.6	503.6
Ref_Te_Opt_Top	5%	16%	6%	53%	21%	9.33	9.21	18.5	503.9
Ref_Te_Opt_Ewp	2%	8%	6%	53%	21%	9.36	9.15	18.5	504.5
Ref_Te_Opt_DGP	0%	17%	7%	53%	21%	9.32	9.49	18.8	503.1
Ref_Te_Opt_MltA	0%	16%	5%	53%	21%	9.32	9.52	18.8	503.1
Ref_CO2_NoBlinds	6%	18%	12%	7%	3.5%	14.93	9.15	24.1	721.3
Ref_CO2_CutOff	1%	11%	8%	7%	3.5%	14.91	10.23	25.1	721.8
Ref_CO2_Opt_Top	5%	14%	8%	7%	3.5%	14.93	9.26	24.2	721.3
Ref_CO2_Opt_Ewp	2%	8%	8%	7%	3.5%	14.95	9.15	24.1	722.2
Ref_CO2_Opt_DGP	0%	17%	10%	7%	3.5%	14.90	9.49	24.4	722.2
Ref_CO2_Opt_MltA	0%	15%	7%	7%	3.5%	14.93	9.59	24.5	723.9
Opt_Te_NoBlinds	6%	18%	7%	46%	36%	2.10	9.15	11.2	93.7
Opt_Te_CutOff	1%	11%	4%	46%	36%	2.09	10.23	12.3	93.6
Opt_Te_Opt_Top	5%	16%	4%	46%	36%	2.10	9.21	11.3	93.7
Opt_Te_Opt_Ewp	2%	8%	4%	46%	36%	2.11	9.15	11.3	94.6
Opt_Te_Opt_DGP	0%	17%	5%	46%	36%	2.09	9.49	11.6	93.9
Opt_Te_Opt_MltA	0%	16%	4%	46%	36%	2.09	9.51	11.6	94.0
Opt_ACH_hh_NoBlinds	6%	18%	8%	21%	4%	19.12	9.15	28.3	939.4
Opt_ACH_hh_CutOff	1%	11%	6%	21%	4%	19.12	10.23	29.3	940.7
Opt_ACH_hh_Opt_Top	5%	16%	6%	21%	4%	19.12	9.21	28.3	939.4
Opt_ACH_hh_Opt_Ewp	2%	8%	6%	21%	4%	19.16	9.15	28.3	940.7
Opt_ACH_hh_Opt_DGP	0%	17%	7%	21%	4%	19.11	9.49	28.6	939.9

Opt_ACH_hh_Opt_MltA	0%	16%	6%	21%	4%	19.11	9.51	28.6	939.9
Opt_Te_CO2_NoBlinds	6%	18%	8%	6%	3%	17.09	9.15	26.2	770.3
Opt_Te_CO2_CutOff	1%	11%	6%	6%	3%	17.06	10.23	27.3	771.0
Opt_Te_CO2_Opt_Top	5%	16%	6%	6%	3%	17.09	9.21	26.3	770.3
Opt_Te_CO2_Opt_Ewp	2%	8%	6%	6%	3%	17.11	9.15	26.3	770.4
Opt_Te_CO2_Opt_DGP	0%	17%	7%	6%	3%	17.04	9.49	26.5	770.2
Opt_Te_CO2_Opt_MltA	0%	16%	5%	6%	3%	17.04	9.51	26.6	770.2
Opt_ΔT_CO2_NoBlinds	6%	18%	9%	7%	3%	15.21	9.15	24.4	727.5
Opt_ΔT_CO2_CutOff	1%	11%	5%	7%	3%	15.18	10.23	25.4	727.7
Opt_ΔT_CO2_Opt_Top	5%	15%	5%	7%	3%	15.21	9.23	24.4	727.5
Opt_ΔT_CO2_Opt_Ewp	2%	8%	5%	7%	3%	15.24	9.15	24.4	727.3
Opt_ΔT_CO2_Opt_DGP	0%	17%	7%	7%	3%	15.17	9.49	24.7	726.1
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltA	0%	15%	4%	7%	3%	15.17	9.55	24.7	726.1
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltB	0%	15%	4%	7%	3%	15.17	9.55	24.7	726.1
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltC	0%	15%	4%	7%	3%	15.17	9.55	24.7	726.1
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltD	2%	8%	5%	7%	3%	15.24	9.16	24.4	727.3
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltE	0%	15%	4%	7%	3%	15.22	9.28	24.5	727.1

#### 4.5.1.1 Controllo della ventilazione

In Figura 20 è possibile esaminare gli indici influenzati dal controllo della ventilazione ( $T_{op,discomfort}$ ,  $ACH_{unsatisfied}$ ,  $CO_{2,discomfort}$ ) per le diverse strategie di ventilazione esaminate, corrispondente alla colonna “NoBlinds” (segnata evidenziata in giallo) della matrice delle strategie presentata in Tabella 17. In Tabella 20 sono riportati i risultati degli indici calcolati differenziati rispetto ai range di comfort: in particolare l’indice  $DGP_{discomfort}$  è stato suddiviso nelle due sottocategorie corrispondenti agli intervalli di DGP disturbatore e molesto; l’indice  $UDI_{discomfort}$  è stato suddiviso nei sottogruppi  $UDI_{fell-short}$  e  $UDI_{exceeded}$ ; l’indice  $T_{op,discomfort}$  è stato suddiviso nei sottoinsiemi caratterizzati da  $T_{op} > T_{op,u}$  ( $T_{op,overheated}$ ) e  $T_{op} < T_{op,l}$  ( $T_{op,underheated}$ ).

È possibile notare subito come la ventilazione abbia un’influenza profonda sugli indici di discomfort legati alla qualità dell’aria (cfr. Figura 20). Le strategie che non effettuano un controllo in questo dominio (Ref\_Te, Opt\_Te) portano a risultati ben al di sopra dei limiti massimi di normativa, e molto scarsi in confronto agli altri controlli. Il controllo basato sui ricambi d’aria (Opt\_ACH\_hh) raggiunge i requisiti normativi in tal senso, ma non risulta del tutto efficace sull’abbassamento dei livelli di CO<sub>2</sub> interni. I controlli che ottimizzano la prestazione in tal senso sono quelli in cui viene utilizzato un sensore di monitoraggio della CO<sub>2</sub> (Ref\_CO2, Opt\_Te\_CO2, Opt\_ΔT\_CO2). A seconda della strategia di ventilazione naturale implementata si raggiunge fino a una differenza di 46 punti percentuali sulla soddisfazione dei limiti da normativa relativi ai livelli di CO<sub>2</sub> (confronto tra Ref\_Te e Opt\_Te\_CO2).

Anche il grado di discomfort termico è influenzato dal controllo della ventilazione, anche se in modo molto ridotto rispetto alla qualità dell’aria. I controlli maggiormente performanti in tal senso sono quelli basati sull’ottimizzazione delle soglie di temperatura (Opt\_Te, Opt\_ACH\_hh, Opt\_Te\_CO2). Si raggiunge una differenza fino a 9 punti percentuale sul soddisfacimento annuale del comfort termico (Bench\_mech e Opt\_Te).

Dal punto di vista energetico la prestazione migliore è raggiunta dalla strategia ottimizzata sulle soglie di temperatura (Opt\_Te), che ha un fabbisogno inferiore anche al benchmark con ventilazione ideale e recupero di calore (cfr. Figura 21), a prezzo tuttavia di un alto discomfort termico (cfr. Figura 20). Con un fabbisogno appena superiore, segue la strategia RBC di benchmark basata sulle soglie di temperatura Ref\_Te, mentre le RBC volte a ottimizzare la qualità dell’aria, hanno un fabbisogno decisamente più alto rispetto alle altre: l’ottimizzazione dei parametri di comfort porta inevitabilmente a un innalzamento del fabbisogno di energia. La strategia basata su schedule oraria è quella con fabbisogno maggiore: è interessante notare che l’ottimizzazione del controllo a parità di prestazione di comfort può portare a un risparmio energetico fino a

3.9 kWh/m<sup>2</sup>a (confronto tra Opt\_ACH\_hh e Opt\_Te\_CO2). La massima differenza di fabbisogno energetico tra le strategie è di 17 kWh/m<sup>2</sup>a (Opt\_Te e Opt\_ACH\_hh). L'andamento dei carichi di picco rispecchia l'andamento dei fabbisogni energetici: in Tabella 20 sono riportati i 99 percentili su tutto l'anno delle potenze richieste all'impianto per riscaldamento. La strategia che minimizza il picco di carico in rete  $P_{p,heating}$  è la Opt\_Te: l'apertura in base a soglie di temperatura ottimizzate evita che l'impianto di riscaldamento debba equilibrare grandi dispersioni di calore dovute alla ventilazione. Seguono il caso ideale Bench\_mech e la reference basata sulle temperature Ref\_Te, e con carichi quasi identici le tre strategie basate su temperatura e sensore di CO<sub>2</sub>. In questo caso è interessante notare che l'introduzione del sensore di CO<sub>2</sub> fa in modo che i carichi di picco delle strategie che ne fanno uso siano equilibrati. Il carico è influenzato dal controllo sulla CO<sub>2</sub> e non dalle soglie di temperatura utilizzate nella strategia.

Il carico di picco maggiore è registrato per la strategia Opt\_ACH\_hh. In essa infatti l'apertura della finestra viene effettuata alle 7:00 di mattina, nel momento del passaggio di set-point dell'impianto di riscaldamento da 12°C a 20°C. L'impianto deve dunque innalzare la temperatura interna all'ufficio alla soglia di 20°C equilibrando anche le dispersioni dovute all'apertura della finestra.

Tra la strategia Opt\_ACH\_hh, che presenta il carico di picco maggiore, e la strategia Opt\_Te, con carico di picco minore, vi è una differenza di 845.7 W.

**Tabella 20: Indici di discomfort e di prestazione energetica dipendenti da ventilazione – Set A**

Strategia di controllo di ventilazione (Assenza di veneziana)	DGP <sub>discomfort</sub> <sub>dist</sub>	DGP <sub>discomfort</sub> <sub>t_int</sub>	UDI <sub>fe</sub> <sub>ll-short</sub>	UDI <sub>exceed</sub> <sub>ded</sub>	T <sub>op,overheat</sub> <sub>ated</sub>	T <sub>op,underheat</sub> <sub>ated</sub>	CO <sub>2,discomfort</sub> <sub>fort</sub>	ACH <sub>unsatisfied</sub> <sub>ified</sub>	EP <sub>heating</sub>	EP <sub>lighting</sub>	EP <sub>global</sub>	P <sub>p,heating</sub> <sub>ng</sub>
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[W]
NoVent	0%	0.05	0%	0.59	0%	0.59	100%	100%	1.3	9.2	10.5	6.0
Bench_mech	0%	0.05	6%	0.08	6%	0.08	0%	0%	8.9	9.2	18.0	263.1
Ref_Te	0%	0.05	2%	0.07	2%	0.07	53%	21%	9.3	9.2	18.5	503.9
Ref_CO2	0%	0.05	0%	0.12	0%	0.12	7%	3%	14.9	9.2	24.1	721.3
Opt_Te	0%	0.05	1%	0.05	1%	0.05	46%	36%	2.1	9.2	11.2	93.7
Opt_ACH_hh	0%	0.05	3%	0.05	3%	0.05	21%	4%	19.1	9.2	28.3	939.4
Opt_Te_CO2	0%	0.05	3%	0.05	3%	0.05	6%	3%	17.1	9.2	26.2	770.3
Opt_ΔT_CO2	0%	0.05	0%	0.08	0%	0.08	7%	3%	15.2	9.2	24.4	727.5

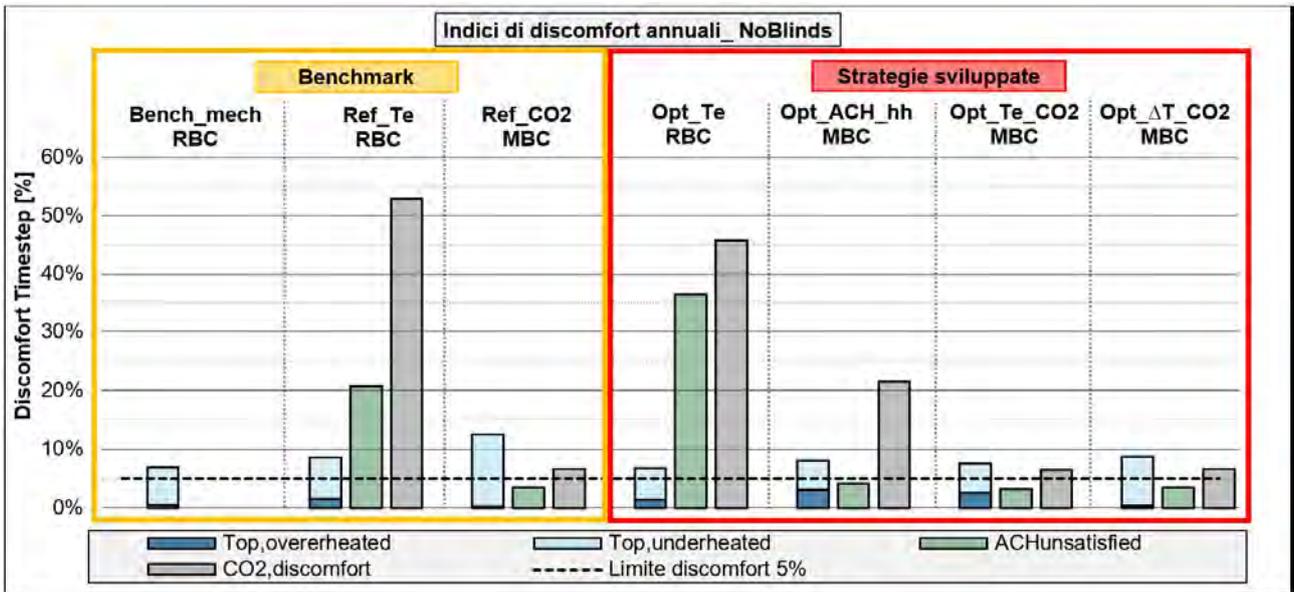


Figura 20: Indici di discomfort annuali dipendenti dalla strategia di ventilazione – set A

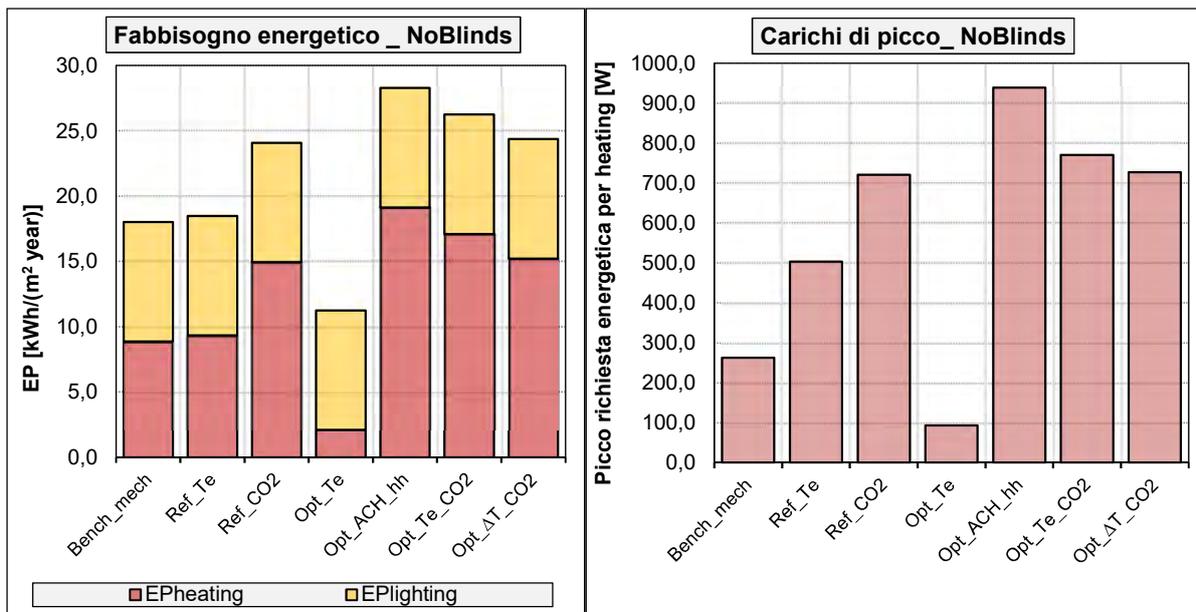


Figura 21: Indici di prestazione energetica dipendenti dalla strategia di ventilazione – set A

#### 4.5.1.2 Ottimizzazione delle strategie di ventilazione

In questa sezione esaminiamo il processo di ottimizzazione del controllo della ventilazione e il suo effetto sulle prestazioni risultanti. In Figura 22A e Figura 23A viene riportato il discomfort termico annuale  $T_{op,discomfort}$  in funzione del fabbisogno energetico  $EP_{GL}$ , due parametri che vengono influenzati sia dal controllo della ventilazione che dal controllo delle veneziane; in Figura 22B e Figura 23B viene riportato il valore di  $CO_{2,discomfort}$  in funzione del valore di  $EP_{GL}$ . La condizione ottimale in una visualizzazione di questo genere corrisponde all'angolo in basso a sinistra, dove il discomfort è pari a 0 e il fabbisogno energetico è minimizzato. I casi limite sono il caso senza ventilazione Novent, segnato con indicatore nero quadrato e la condizione ideale Bench\_mech (indicatore rosso quadrato), in cui la qualità dell'aria è massimizzata mantenendo un basso dispendio energetico e un basso discomfort termico. L'introduzione di una soglia di temperatura nel controllo influisce sulla prestazione secondo le linee segnate in grigio spostando la prestazione sugli indicatori X in Figura 22 A e B: si abbassa il livello di discomfort termico e di  $CO_{2,discomfort}$ . Al contempo, a seconda della selezione dei treshold di temperatura, si assiste ad una diminuzione della richiesta energetica maggiore nel caso della strategia Opt\_Te e minore nel caso di Ref\_Te. In Figura 23 A e B, osservando gli indicatori circolari, si può osservare cosa accade quando viene introdotto un controllo sulla qualità dell'aria: il controllo Opt\_ACH\_hh, basato sul calcolo dei ricambi d'aria, migliora la prestazione in tal senso, a prezzo di un alto incremento di fabbisogno energetico e senza apportare cambiamento al livello di discomfort termico. Utilizzare un sensore di  $CO_2$  permette di razionalizzare l'apertura delle finestre migliorando la qualità dell'aria rispetto al controllo precedente e mantenendo lo stesso grado di discomfort termico. I controlli basati su  $CO_2$  (Opt\_ΔT\_CO2 e Opt\_Te\_CO2) portano a un dispendio energetico maggiore rispetto ai controlli su temperatura, ma minore rispetto al modello basato sui ricambi d'aria. Si può notare tuttavia come nessuno dei modelli riesca a far rientrare il livello di discomfort al di sotto della soglia del 5% da normativa [79].

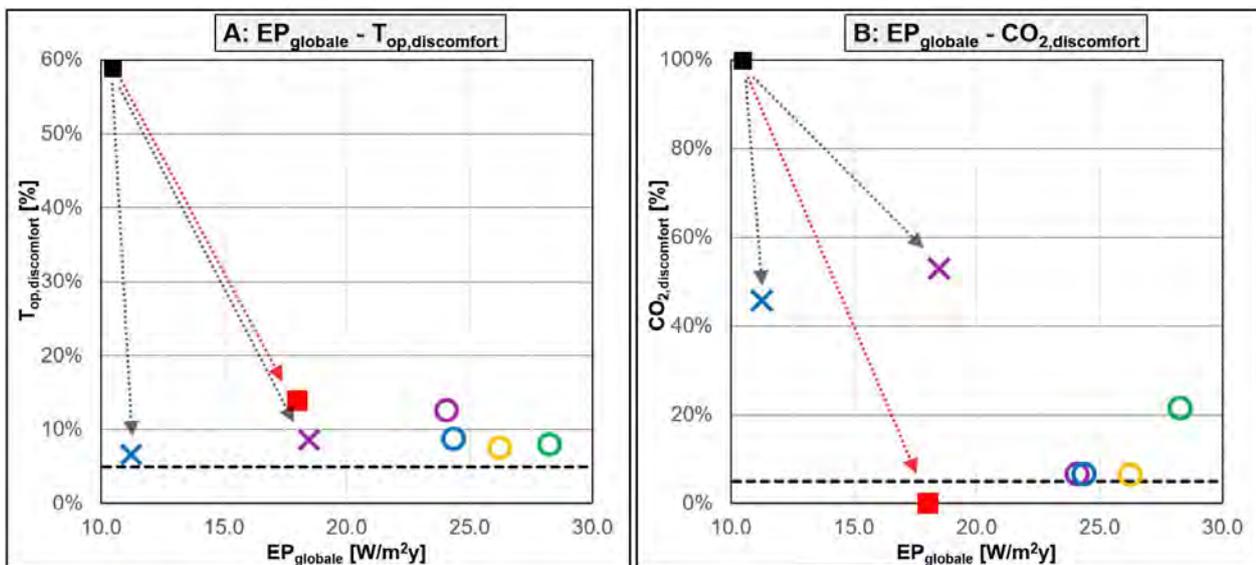


Figura 22: Indici di discomfort dipendenti da ventilazione: controllo sulle temperature; A= fabbisogno energetico e comfort termico; B= fabbisogno energetico e IAQ

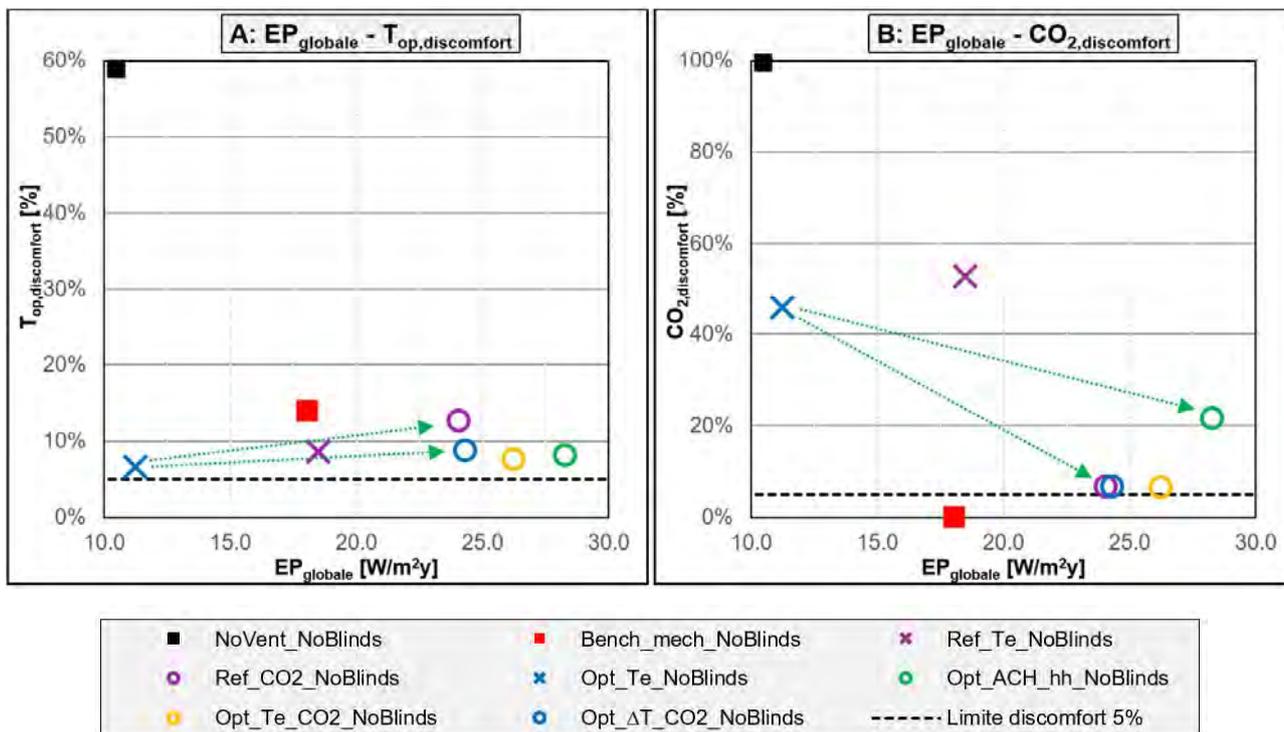


Figura 23: Indici di discomfort dipendenti da ventilazione: controllo sull'IAQ; A= fabbisogno energetico e comfort termico; B= fabbisogno energetico e IAQ

#### 4.5.1.3 Controllo della veneziana

In questa sezione viene indagata nel dettaglio la prestazione delle strategie di controllo della veneziana a parità di controllo sulla ventilazione (riga Opt\_ΔT\_CO2 evidenziata in rosso nella matrice delle simulazioni). Il controllo sulle veneziane influisce sui seguenti parametri:  $DGP_{comfort}$ ,  $T_{op,comfort}$ ,  $UDI_{achieved}$ : nella Tabella 21 e Figura 24 sono riportati i dati relativi agli indici di comfort calcolati suddivisi in sottocategorie.

In Figura 24 si può osservare la variazione dell'indice  $DGP_{discomfort}$ . I risultati relativi al discomfort per abbagliamento hanno una variazione massima di 6 punti percentuali; tale variazione ridotta è dovuta all'esposizione del caso studio, che essendo rivolto ad ovest è soggetto all'entrata della radiazione diretta (maggiore responsabile dell'abbagliamento) per un ridotto lasso di tempo giornaliero. Tutti i controlli portano l'indice di  $DGP_{discomfort}$  sotto la soglia del 5%. Il caso peggiore è il NoBlinds, dove non esiste nessun tipo di controllo sulla luce entrante; il secondo riferimento (CutOff), controllando l'entrata della radiazione diretta, decrementa consistentemente il discomfort per abbagliamento, anche se non è la strategia con prestazione migliore perché non effettua nessun controllo sulle luminanze in assenza di radiazione diretta. Le prestazioni migliori sono date dalle strategie che utilizzano il DGP come parametro di decisione diretto nel controllo (Opt\_DGP e Opt\_MltA); le altre portano a prestazioni intermedie. In Figura 26A è possibile visualizzare la variazione del discomfort per abbagliamento in funzione del fabbisogno energetico  $EP_{GL}$ . I risultati dei casi limite sono segnati con indicatore nero (NoBlinds) e con indicatore rosso (CutOff). È possibile notare come tutte le strategie limitino il valore di  $DGP_{discomfort}$ , a prezzo di un maggiore, seppure in questo caso molto limitato per le ragioni citate precedentemente, fabbisogno energetico (fino a un massimo di 1 kWh/m²). Le strategie che minimizzano il  $DGP_{discomfort}$  (Opt\_DGP e Opt\_MltA) sono quelle con fabbisogni maggiore; si può presupporre che il controllo di tale parametro sia dunque il più influente sul fabbisogno finale nel caso analizzato. Seguono CutOff e Opt\_MltE, con una variazione inferiore a 1 punto percentuale sull'abbagliamento e una minima variazione energetica per Opt\_MltE, mentre il CutOff porta a fabbisogni più alti; seguono infine Opt\_Eh e Opt\_Top, con fabbisogno energetico quasi identico al caso NoBlinds, e scarso controllo dell'abbagliamento.

Osservando i risultati relativi al comfort visivo per illuminamento su piano di Figura 24 è possibile notare come la consistente variazione dei risultati sia principalmente dovuta al cambiamento del valore di  $UDI_{exceeded}$ . Il caso di riferimento NoBlinds è quello con prestazione peggiore, non effettuando nessun tipo di controllo sulla luce entrante; il Cutoff riesce invece a limitare lo  $UDI_{exceeded}$ , ma incrementa il valore di  $UDI_{fell-short}$ , poiché impedisce costantemente l'entrata della radiazione diretta. Le strategie con prestazione migliore sono quelle che considerano il controllo degli illuminamenti nel processo decisionale (Opt\_Ewp e Opt\_MltE). Le altre portano a indici di discomfort oltre il 15%; nessuna delle strategie comunque riesce a mantenere lo  $UDI_{discomfort}$  sotto la soglia del 5% annuale. In Figura 26B si può osservare la variazione dello  $UDI_{discomfort}$  in funzione del fabbisogno energetico, con le strategie di riferimento segnate in nero (NoBlinds) e in rosso (Cutoff). Anche in questo caso il controllo degli illuminamenti porta a una variazione di fabbisogno energetico molto limitato, a fronte di una variazione del parametro di discomfort di 10 punti percentuali. Le strategie Opt\_Ewp e Opt\_MltE abbassano drasticamente lo  $UDI_{discomfort}$  mantenendo un fabbisogno energetico quasi invariato; le altre strategie (Opt\_DGP, Opt\_Top, Opt\_MltA) hanno prestazioni che le pongono tra i due casi di riferimento, senza incidere positivamente sul discomfort.

In Figura 24 nota come la variazione dei risultati di discomfort termico in base al controllo della veneziana sia limitata. I casi con prestazione peggiore sono quelli che non controllano direttamente il parametro (NoBlinds e Opt\_DGP), ad eccezione del caso Opt\_Eh, che porta risultati comparabili ai casi con controllo diretto del parametro di  $T_{op*}$ . Questo è dovuto al fatto che il controllo sugli illuminamenti limita il superamento della soglia dei 3000 lx su piano di lavoro, dovuta principalmente alla radiazione diretta sul piano, e identifica dunque molti momenti in cui anche l'occupante è soggetto a radiazione diretta, limitando il rischio di surriscaldamento. Le strategie di costo Opt\_MltA e Opt\_MltE sono quelle che portano a prestazioni migliori, seguite da Opt\_Top e CutOff. Tale risultato in apparenza contraddittorio è dovuto al fatto che la Opt\_Top, pur essendo ottimizzata sul comfort termico, chiude la veneziana in base alla radiazione diretta che raggiunge il sensore, o alla temperatura interna misurata nel momento corrente. Tuttavia essa non è in grado di predire il superamento delle soglie di comfort per surriscaldamento dell'aria, e prendendo decisioni reattive, che vengono messe in atto al timestep successivo, permette che la soglia di  $T_{op*}$  di comfort sia superata a causa della temperatura dell'aria interna. Le strategie che prevedono una chiusura più frequente della veneziana basata su altri criteri, quali il CutOff o il controllo dell'abbagliamento o dell'illuminamento orizzontale riescono a prevenire tali momenti di discomfort, anticipando la chiusura. Le strategie portano a prestazioni comparabili, ad eccezione della Opt\_DGP, che presenta un comportamento leggermente meno performante per quanto riguarda il livello di discomfort.

In Figura 25A si può notare come la variazione di fabbisogno energetico dovuta al controllo della veneziana sia estremamente limitata, e principalmente dovuta alle variazioni su  $EP_L$ , energia necessaria a garantire l'illuminazione sul piano di lavoro. A seconda dell'angolo di chiusura delle veneziane e della percentuale di timestep annuali in cui esse vengono chiuse per garantire la prestazione di comfort infatti varia l'accensione e la dimmerazione dell'impianto di illuminazione volto a garantire i 300 lx sul piano di lavoro. La variazione sui carichi di picco dell'impianto è trascurabile (Figura 25B).

In generale le strategie che riescono a ottimizzare contemporaneamente i parametri energetici e di comfort sono la Opt\_MltE e Opt\_MltD, seguite da Opt\_Ewp, che però non ottimizza l'abbagliamento. L'introduzione di una funzione di costo e dei modelli di calcolo permette effettivamente di ottimizzare le prestazioni.

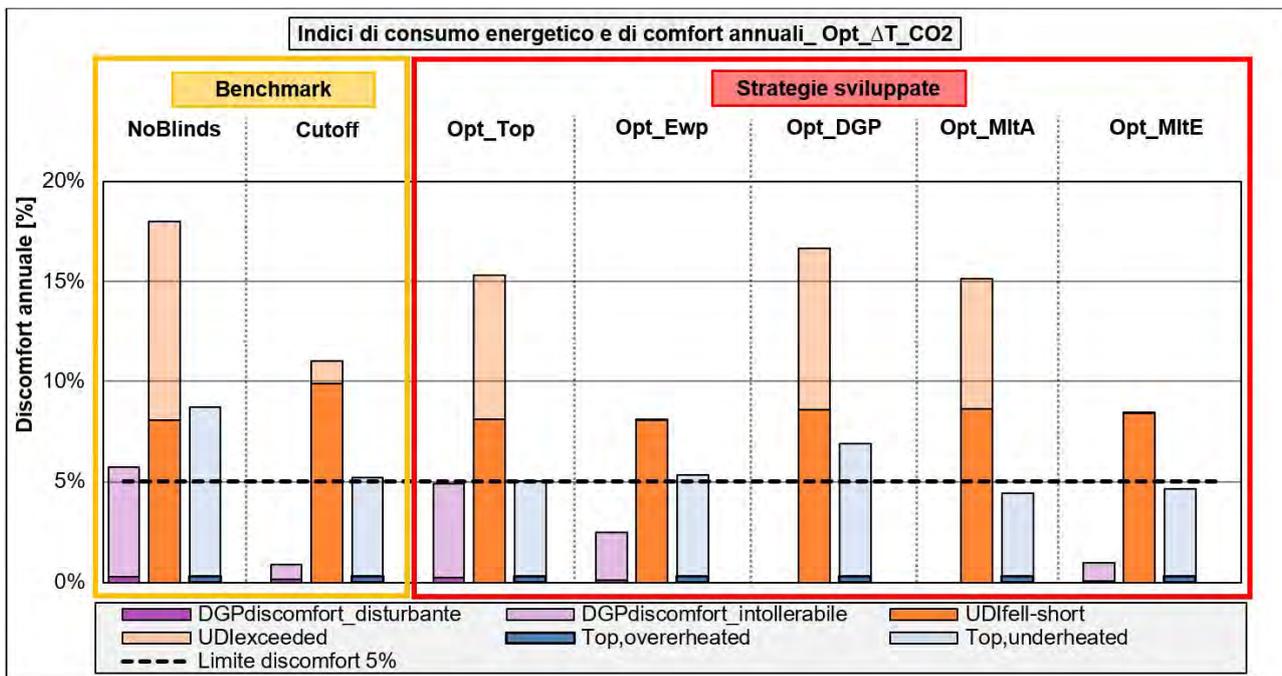


Figura 24: Indici di discomfort annuali dipendenti dal controllo della veneziana– set A

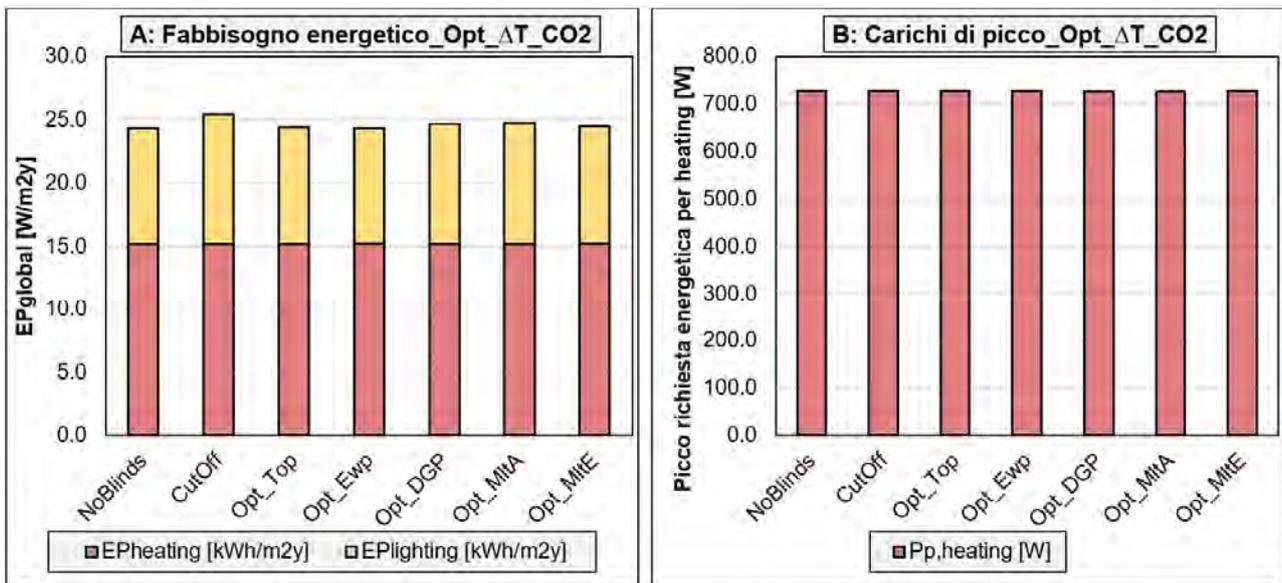


Figura 25: Indici di prestazione energetica dipendenti dal controllo della veneziana – set A: A= fabbisogno energetico; B= carichi di picchi

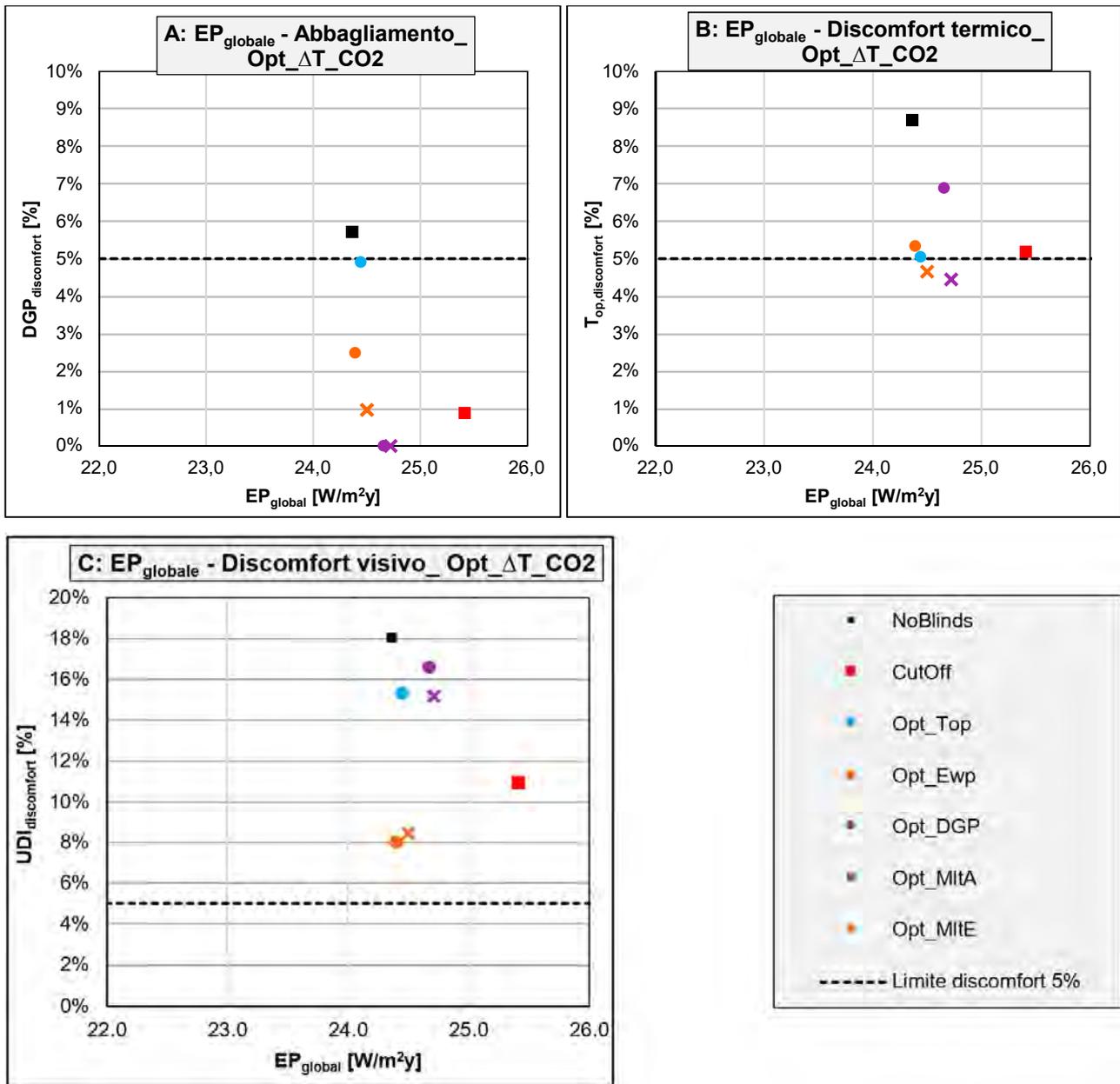


Figura 26: Indici di discomfort in funzione del fabbisogno energetico a seconda del controllo sulla veneziana: A= abbagliamento; B= discomfort termico; C= illuminamento orizzontale

Tabella 21: Indici di discomfort e fabbisogno energetico dipendenti dal controllo sulla veneziana

Strategia di controllo	DGP <sub>disco</sub>	DGP <sub>disc</sub>	UDI <sub>rel</sub>	UDI <sub>exce</sub>	Top,overe	Top,under	CO <sub>2,disco</sub>	ACH <sub>unsa</sub>	EP <sub>heating</sub>	EP <sub>lighting</sub>	EP <sub>global</sub>	P <sub>p,heating</sub>
	mfort <sub>dist</sub>	omfort <sub>int</sub>	short	eded	rheated	heated	mfort	tified	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[W]
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
Opt_ΔT_CO2_NoBlinds	0%	0.05	0%	0.08	0%	0.08	7%	3%	15.2	9.2	24.4	727.5
Opt_ΔT_CO2_CutOff	0%	0.01	0%	0.05	0%	0.05	7%	3%	15.2	10.2	25.4	727.7
Opt_ΔT_CO2_Opt_Top	0%	0.05	0%	0.05	0%	0.05	7%	3%	15.2	9.2	24.4	727.5
Opt_ΔT_CO2_Opt_Ewp	0%	0.02	0%	0.05	0%	0.05	7%	3%	15.2	9.2	24.4	727.3
Opt_ΔT_CO2_Opt_DGP	0%	0.00	0%	0.07	0%	0.07	7%	3%	15.2	9.5	24.7	726.1
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltA	0%	0.00	0%	0.04	0%	0.04	7%	3%	15.2	9.6	24.7	726.1
Opt_ΔT_CO2_Opt_MltE	0%	0.01	0%	0.04	0%	0.04	7%	3%	15.2	9.3	24.5	727.1

**4.5.1.4 Controllo multi-obiettivo della veneziana**

La descrizione dei pesi associati ai parametri di controllo è descritta nel paragrafo 4.4.2.

In Figura 27 è possibile notare come quando il peso maggiore della funzione di costo è associato al parametro del DGP (Opt\_MItA) o al DGP in corrispondenza con la temperatura operativa (Opt\_MItB e Opt\_MItC) le strategie eliminano il discomfort per abbagliamento, in modo simile al controllo Opt\_DGP. I risultati di  $DGP_{discomfort}$ ,  $UDI_{discomfort}$ ,  $T_{op,discomfort}$  e fabbisogno energetico sono quasi identici: in questo caso studio l'ottimizzazione dei parametri DGP e  $T_{op}$  è in accordo, poichè in entrambi i casi mira principalmente a limitare l'arrivo della radiazione diretta all'interno dell'ambiente e sull'occupante, il primo a livello dell'occhio e il secondo sul corpo. Quando viene inserito il controllo sugli illuminamenti (Opt\_MItD e Opt\_MItE) a fronte di un lieve aumento del grado di abbagliamento si registra un dimezzamento dello  $UDI_{discomfort}$ . Il discomfort termico, così come la prestazione energetica, rimane quasi del tutto invariato. Considerare i tre parametri di comfort nella funzione di costo con lo stesso peso (Opt\_MItE) fa diminuire il discomfort per abbagliamento rispetto al caso in cui viene dato peso maggiore all'illuminamento orizzontale.

In Figura 28 possiamo vedere la relazione tra fabbisogno energetico e i tre parametri di comfort. È possibile notare come le strategie che si avvicinano all'ottimo (in basso a sinistra, con discomfort 0 e fabbisogno energetico minimo) nei tre casi siano la Opt\_MItD e la Opt\_MItE.

Risulta dunque necessario nella costruzione di una funzione di costo considerare sia il DGP che l'illuminamento orizzontale.

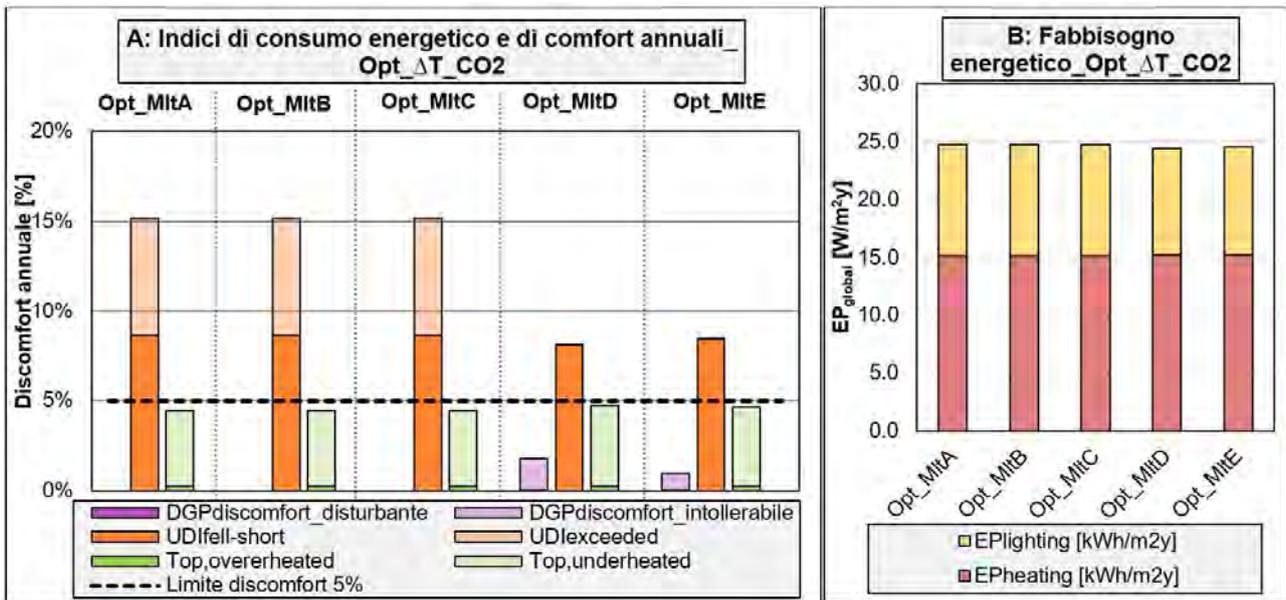
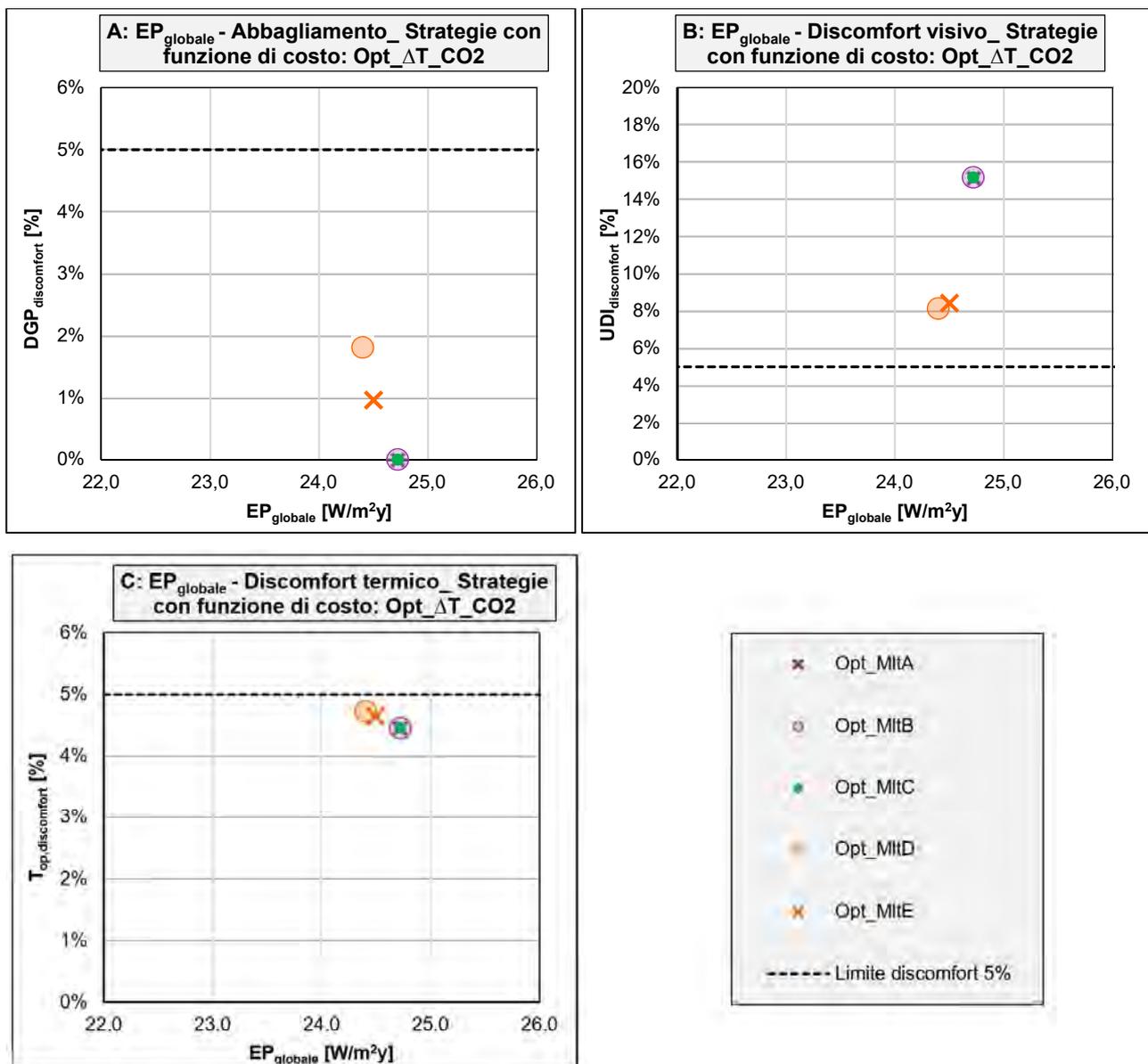


Figura 27: Indici di discomfort (A) e fabbisogno energetico (B) dipendenti dalla funzione di costo applicata



**Figura 28: Indici di discomfort in funzione del fabbisogno energetico a seconda della funzione di costo applicata: A= abbagliamento; B= illuminamento orizzontale; C= discomfort termico**

#### 4.5.1.5 Impatto del Controllo della Ventilazione Naturale e delle Veneziane.

In questa sezione vengono esaminati i risultati relativi ai due parametri che vengono influenzati dall'attuazione di entrambi i componenti adattivi ( $EP_{global}$  e  $T_{op,discomfort}$ ). I fabbisogni energetici sono infatti soggetti a cambiamento in base alla variazione della radiazione diretta entrante all'interno dell'ambiente, controllata tramite la veneziana, e allo stesso tempo in base alla temperatura dell'aria esterna che entra all'interno dell'ambiente con l'apertura della finestra. Allo stesso modo il discomfort termico calcolato secondo il metodo presentato nella sezione 4.2.2 è influenzato dalla quantità di radiazione diretta che raggiunge l'occupante (controllata sempre grazie alle veneziane), e dalla temperatura dell'aria. Nella Figura 29 vengono presentati i risultati di tutte le strategie di controllo. In ascissa viene indicato il valore del fabbisogno energetico, mentre in ordinata il valore di discomfort termico. L'ottimo si trova nell'angolo in basso a sinistra, in corrispondenza del fabbisogno energetico e di una percentuale di discomfort minimi (origine degli assi del grafico). I casi relativi alla stessa strategia di ventilazione sono presentati con lo stesso colore: la posizione dei gruppi di indicatori indica dunque la loro vicinanza all'ottimo e la loro efficacia nell'ottimizzazione dei parametri indagati. La dispersione lungo l'asse y degli indicatori dello stesso colore

indica l'influenza delle veneziane sul controllo del discomfort termico. La distanza su asse y dei gruppi di indicatori con colore diverso indica l'influenza delle strategie di ventilazione sul controllo del discomfort termico. Allo stesso modo sull'asse delle ascisse la dispersione degli indicatori dello stesso colore indica l'influenza delle veneziane sul fabbisogno energetico e la dispersione dei gruppi di indicatori con colore diverso indica l'influenza delle strategie di ventilazione sul fabbisogno energetico. Si nota come la ventilazione abbia l'effetto preponderante sulla variazione dei fabbisogni energetici; allo stesso tempo per raggiungere un valore di discomfort termico annuale inferiore al 5% è necessaria l'attuazione di entrambi i controlli. Nella Figura 30 è possibile esaminare le variazioni massime sul fabbisogno energetico, sui carichi di picco e sugli indicatori di discomfort a seconda degli attuatori considerati. In particolare il controllo sulle veneziane porta a una variazione massima di 1.1 kWh/m<sup>2</sup>a sui fabbisogni, mentre il controllo sulla ventilazione porta a una variazione massima di 17.1 kWh/m<sup>2</sup>a sui fabbisogni. Dal punto di vista del comfort termico il controllo sulle veneziane porta a una variazione massima di 5.6 punti percentuali sulla percentuale di discomfort annuale, mentre il controllo sulla ventilazione porta a una variazione massima di 8.1 sulla percentuale di discomfort annuale. La variazione in punti percentuali sull'abbagliamento è di 5.7 ed è dovuta esclusivamente all'uso delle veneziane, così come per la variazione sul discomfort per illuminamento orizzontale, pari a 10 punti percentuali. Sui carichi di picco la variazione massima è dovuta alla ventilazione ed è pari a 245 W. In questo caso studio dunque sia il controllo delle veneziane che quello sulla ventilazione portano variazioni significative ai risultati.

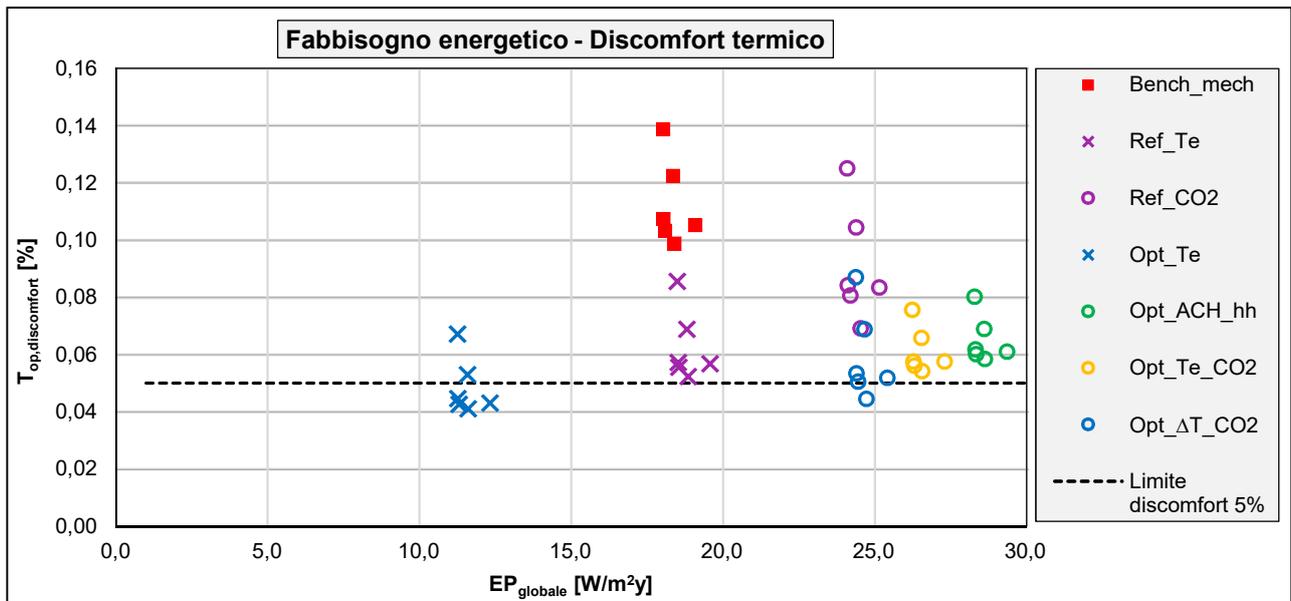


Figura 29: Discomfort termico in funzione del fabbisogno energetico per tutte le strategie analizzate

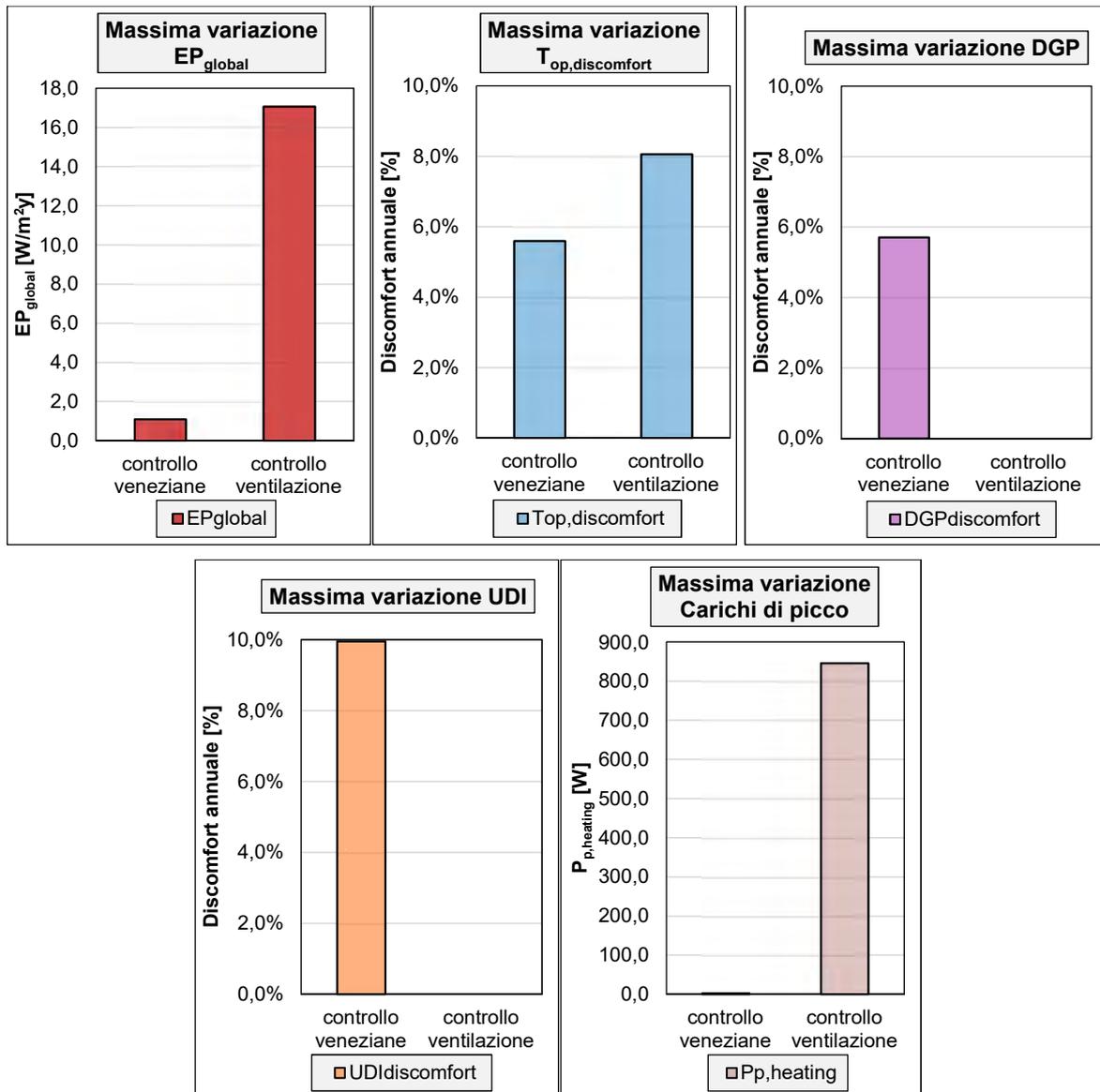


Figura 30: Massime variazioni degli indici analizzati in base ai due attuatori (veneziane e ventilazione) – Set A

**4.5.2 Risultati dello scenario B (impianto di riscaldamento e raffrescamento)**

In questa sezione sono presentati i risultati delle strategie del set B della matrice di simulazioni presentata in Tabella 15. Per questo set sono stati simulati solo i casi limite per il controllo delle veneziane, i casi di riferimento (Ref\_Te, Ref\_CO2) e quelli che ottimizzano i parametri di comfort (Opt\_ΔT\_CO2) e il fabbisogno energetico (Opt\_Te) per le strategie sviluppate. Vengono presentate anche il caso con assenza di ventilazione e finestra continuamente aperta (Vent05). In Tabella 22 si leggono i risultati delle simulazioni: Il codice colori è lo stesso presentato nel paragrafo 4.5.1.

**Tabella 22 Risultati matrice delle simulazioni – Set B**

Strategia di controllo	DGP <sub>discomf</sub> <sub>ort</sub>	UDI <sub>discomf</sub> <sub>ort</sub>	T <sub>op,discomf</sub> <sub>ort</sub>	CO <sub>2,discomf</sub> <sub>ort</sub>	ACH <sub>unsatisfi</sub> <sub>ed</sub>	EP <sub>heating</sub>	EP <sub>cooling</sub>	EP <sub>lighting</sub>	EP <sub>global</sub>	P <sub>p,heating</sub>	P <sub>p,cooling</sub>
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[kWh/m <sup>2</sup> y]	[W]	[W]
NoVent_NoBlinds	6%	18%	6%	100%	100%	1.33	16.15	9.15	10.5	6.0	380.1
Vent05_NoBlinds	6%	18%	7%	0%	0%	59.50	8.24	9.15	76.9	1818	454.2
Bench_mech_NoBlinds	6%	18%	7%	0%	0%	8.86	8.06	9.15	26.1	263.1	379.3
Bench_mech_CutOff	1%	11%	6%	0%	0%	7.79	7.60	10.23	25.6	264.2	370.8
Ref_Te_NoBlinds	6%	18%	2%	64%	24%	9.33	7.02	9.15	25.5	503.9	324.9
Ref_Te_CutOff	1%	11%	2%	65%	24%	9.33	6.51	10.23	26.1	503.6	310.0
Ref_CO2_NoBlinds	6%	18%	1%	7%	3.5%	14.93	9.78	9.15	33.9	721.3	415.4
Ref_CO2_CutOff	1%	11%	0%	7%	3.5%	14.91	9.25	10.23	34.4	721.8	402.3
Opt_Te_NoBlinds	6%	18%	2%	46%	36%	2.10	7.86	9.15	19.1	93.7	419.0
Opt_Te_CutOff	1%	11%	1%	46%	36%	2.09	7.51	10.23	19.8	93.6	408.6
Opt_ΔT_CO2_NoBlinds	6%	18%	1%	7%	3%	15.21	9.21	9.15	33.6	727.5	453.7
Opt_ΔT_CO2_CutOff	1%	11%	0%	7%	3%	15.18	8.80	10.23	34.2	727.7	442.4

**4.5.2.1 Controllo della ventilazione**

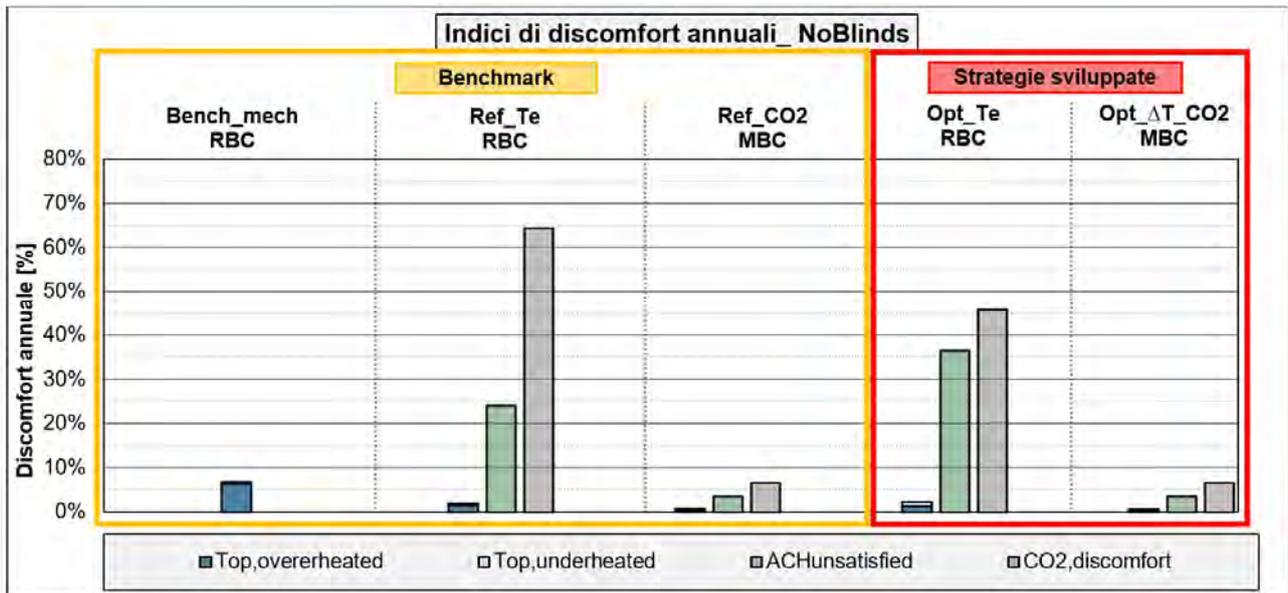
In questa sezione viene esaminata l’influenza del controllo della ventilazione, e in particolare la colonna “NoBlinds” (segnata con riquadro giallo) del set B della matrice delle strategie (cfr. Tabella 18). In Tabella 23 si leggono i risultati suddivisi per sottocategorie di comfort.

Il cambiamento della strategia di ventilazione, come nel set A, ha grande effetto sui parametri riguardanti la qualità dell’aria interna, mentre ha un effetto decisamente più limitato rispetto al discomfort termico (vedere Figura 31). Questo perché l’impianto di cooling sopperisce all’effetto prima raggiunto dalla ventilazione naturale. I controlli basati sulla temperatura interna (Ref\_Te.), avendo meno necessità di diminuire un’alta temperatura interna, prevedono un’apertura meno frequente delle finestre, e dunque un peggioramento delle condizioni di qualità dell’aria rispetto alle simulazioni del set A. Quando viene introdotto un impianto di cooling è dunque necessario progettare adeguatamente il controllo della ventilazione, tenendo conto della diversità delle condizioni interne.

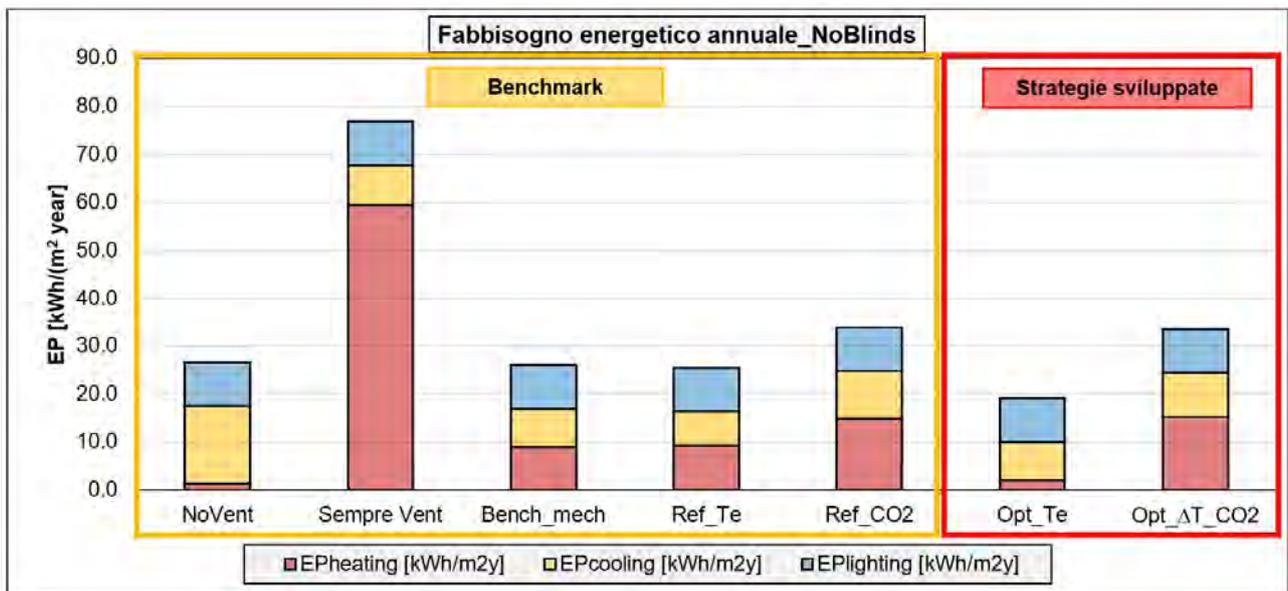
Anche gli effetti sul fabbisogno energetico (Figura 32) rimangono consistenti: la variazione più influente continua ad essere quella del fabbisogno per riscaldamento, ma si notano delle variazioni anche sul fabbisogno per cooling, fino a un massimo di 2.8 kWh/m<sup>2</sup>a. Il controllo basato sull’ottimizzazione delle soglie di temperatura (Opt\_Te) continua ad avere il funzionamento energetico migliore; dal punto di vista del comfort invece la strategia ottimizzata sviluppata e la reference sono quelle con funzionamento migliore e risultati comparabili (Ref\_CO2, Opt\_ΔT\_CO2). Sui carichi di picco (Figura 33) la variazione maggiore rimane sulle richieste di heating; nel caso di richieste per cooling abbiamo una variazione massima di 144.3 W.

**Tabella 23: Indici di discomfort e di prestazione energetica dipendenti da ventilazione – Set B**

Strategia di controllo	DGP <sub>disc</sub> <sub>omfort_dis</sub> <sub>t</sub>	DGP <sub>disc</sub> <sub>omfort_int</sub>	UDI <sub>feil-</sub> <sub>short</sub>	UDI <sub>exce-</sub> <sub>ded</sub>	T <sub>op,over-</sub> <sub>reheated</sub>	T <sub>op,under-</sub> <sub>heated</sub>	CO <sub>2,disco-</sub> <sub>mfort</sub>	ACH <sub>unsa-</sub> <sub>tisfied</sub>	EP <sub>heati-</sub> <sub>ng</sub>	EP <sub>coolin-</sub> <sub>g</sub>	EP <sub>lightin-</sub> <sub>g</sub>	EP <sub>global</sub>	P <sub>p,heating</sub>	P <sub>p,cooling</sub>
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kWh /m <sup>2</sup> y]	[kWh /m <sup>2</sup> y]	[kWh /m <sup>2</sup> y]	[kWh /m <sup>2</sup> y]	[W]	[W]
NoVent	0%	0.05	8%	10%	0%	6%	100%	100%	1.3	16.2	9.2	10.5	6.0	380.1
Vent05	0%	0.05	8%	10%	14%	0%	0%	0%	59.5	8.2	9.2	76.9	1817.8	454.2
Bench	0%	0.05	8%	10%	6%	0%	0%	0%	8.9	8.1	9.2	26.1	263.1	379.3
Ref_Te	0%	0.05	8%	10%	2%	0%	64%	24%	9.3	7.0	9.2	25.5	503.9	324.9
Ref_CO2	0%	0.05	8%	10%	0%	1%	7%	4%	14.9	9.8	9.2	33.9	721.3	415.4
Opt_Te	0%	0.05	8%	10%	1%	1%	46%	36%	2.1	7.9	9.2	19.1	93.7	419.0
Opt_ΔT_CO2	0%	0.05	8%	10%	0%	0%	7%	3%	15.2	9.2	9.2	33.6	727.5	453.7



**Figura 31: Indici di discomfort annuali dipendenti dalla strategia di ventilazione – Set B**



**Figura 32: Indici di fabbisogno energetico dipendenti dalla strategia di ventilazione – Set B**

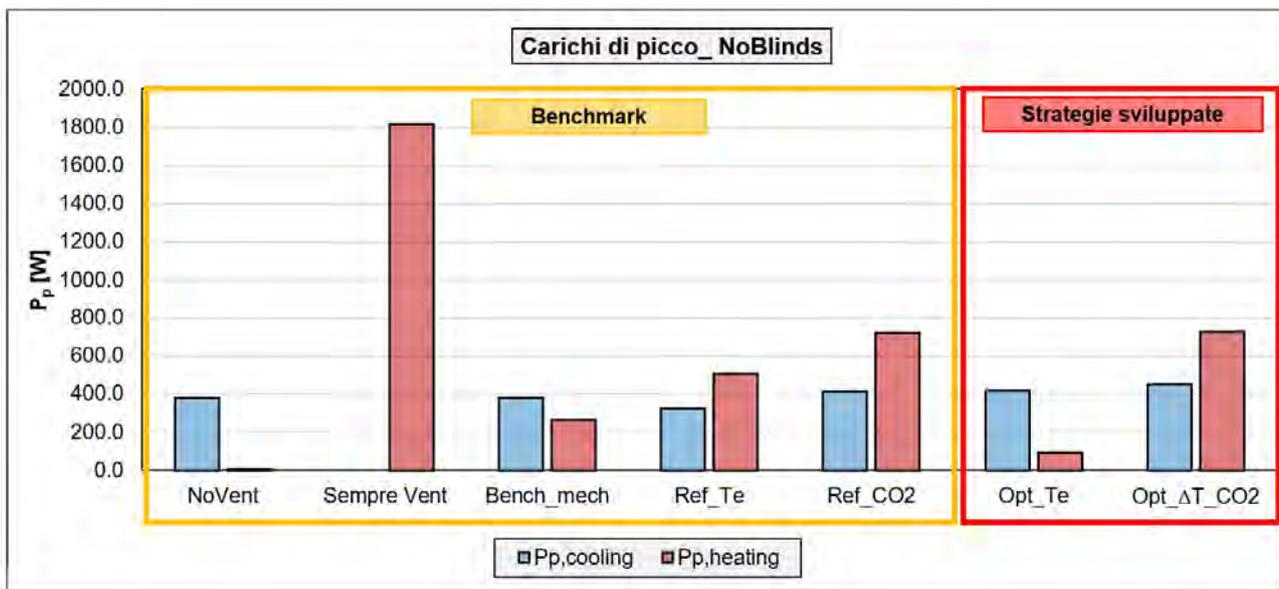


Figura 33: Frattile al 99% dei carichi di picco a seconda della strategia di ventilazione – set B

4.5.2.2 **Controllo della veneziana**

L’analisi sul controllo delle veneziane si limita ai due casi limite: assenza di veneziana e CutOff. Le considerazioni sul discomfort visivo rimangono invariate rispetto a quelle presentate nel paragrafo 4.5.1.3; per quanto riguarda il discomfort termico (Figura 34) la variazione tra i due casi è strettamente limitata e inferiore a un punto percentuale. L’impianto di cooling aiuta a mitigare il discomfort estivo dovuto alla temperatura dell’aria, dunque la veneziana verrà utilizzata meno frequentemente al fine di ridurre la  $T_{op}^*$  misurata. Dal punto di vista del fabbisogno energetico e dei carichi di picco le due prestazioni sono quasi identiche (Figura 35).

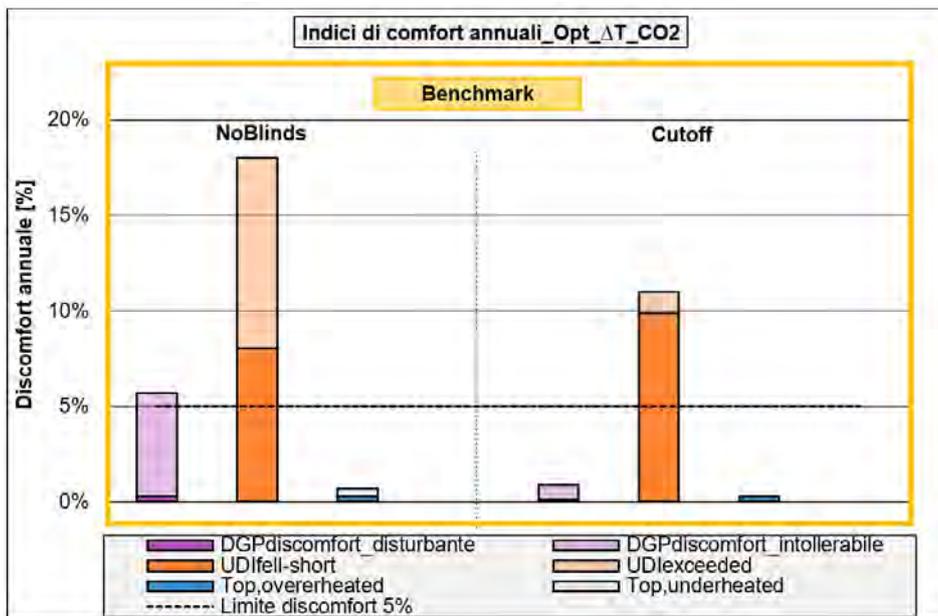
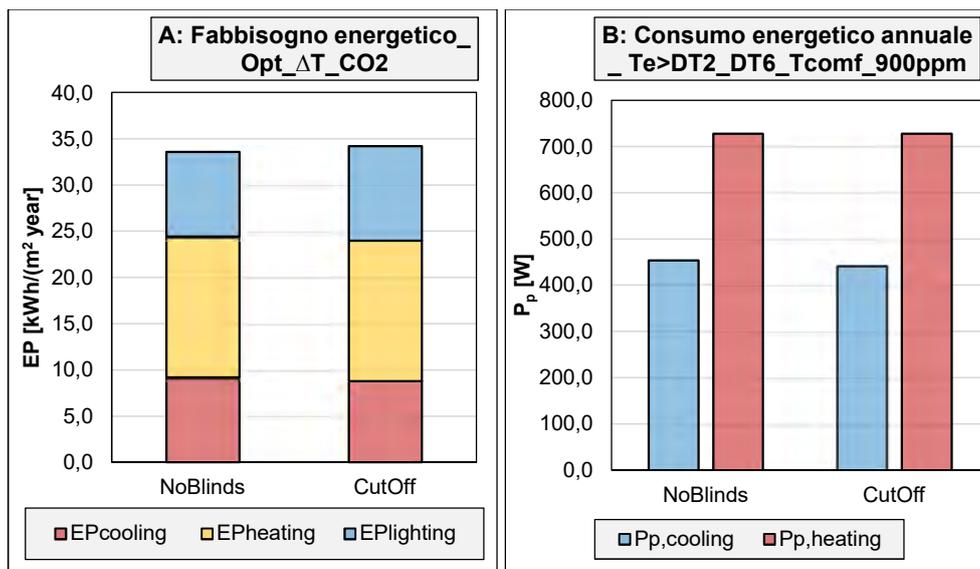


Figura 34: Indici di discomfort annuali dipendenti dal controllo della veneziana – Set B



**Figura 35: Indici di prestazione energetica a seconda del controllo della veneziana – Set B: A=fabbisogno energetico; B= Carichi di picco**

#### 4.5.2.3 ***Impatto del Controllo della Ventilazione Naturale e delle Veneziane.***

Benchè l'indagine in questo caso risulti limitata dato il numero ristretto di strategie considerate, dai grafici in Figura 36 è possibile notare come anche dai risultati con set B l'influenza della ventilazione sia preponderante sui fabbisogni energetici e sul controllo del discomfort termico interno ( $EP_{global}$  e  $T_{op,discomfort}$ , rispettivamente). La variazione della ventilazione può causare una differenza fino a 14.75 kWh/m<sup>2</sup>a sul fabbisogno energetico globale, e fino a 6 punti percentuali sulla variazione del discomfort termico annuale. Il controllo delle veneziane al Cutoff invece porta a una differenza rispetto al caso senza veneziane di 0.7 kWh/m<sup>2</sup>a sul fabbisogno energetico globale, e di 1 punto percentuale sul discomfort termico. La diminuzione della percentuale discomfort è data dall'accensione dell'impianto di cooling, che limita i casi di discomfort estivo. La variazione del DGP e del discomfort per illuminamento orizzontale, dovuti esclusivamente al controllo della veneziana, è pari rispettivamente a 4.8 e 7 punti percentuali. La variazione dei carichi di picchi di riscaldamento maggiore è dovuta alla strategia di ventilazione (633 W): il controllo della veneziana è ininfluente su questo parametro. Dal punto di vista di carichi di climatizzazione la variazione preponderante è sempre dipendente dalla ventilazione (128.8 W), benchè molto minore rispetto a quella sui carichi di riscaldamento, ma anche il controllo delle veneziane assume una minima influenza: la massima variazione è pari a 14.9 W.

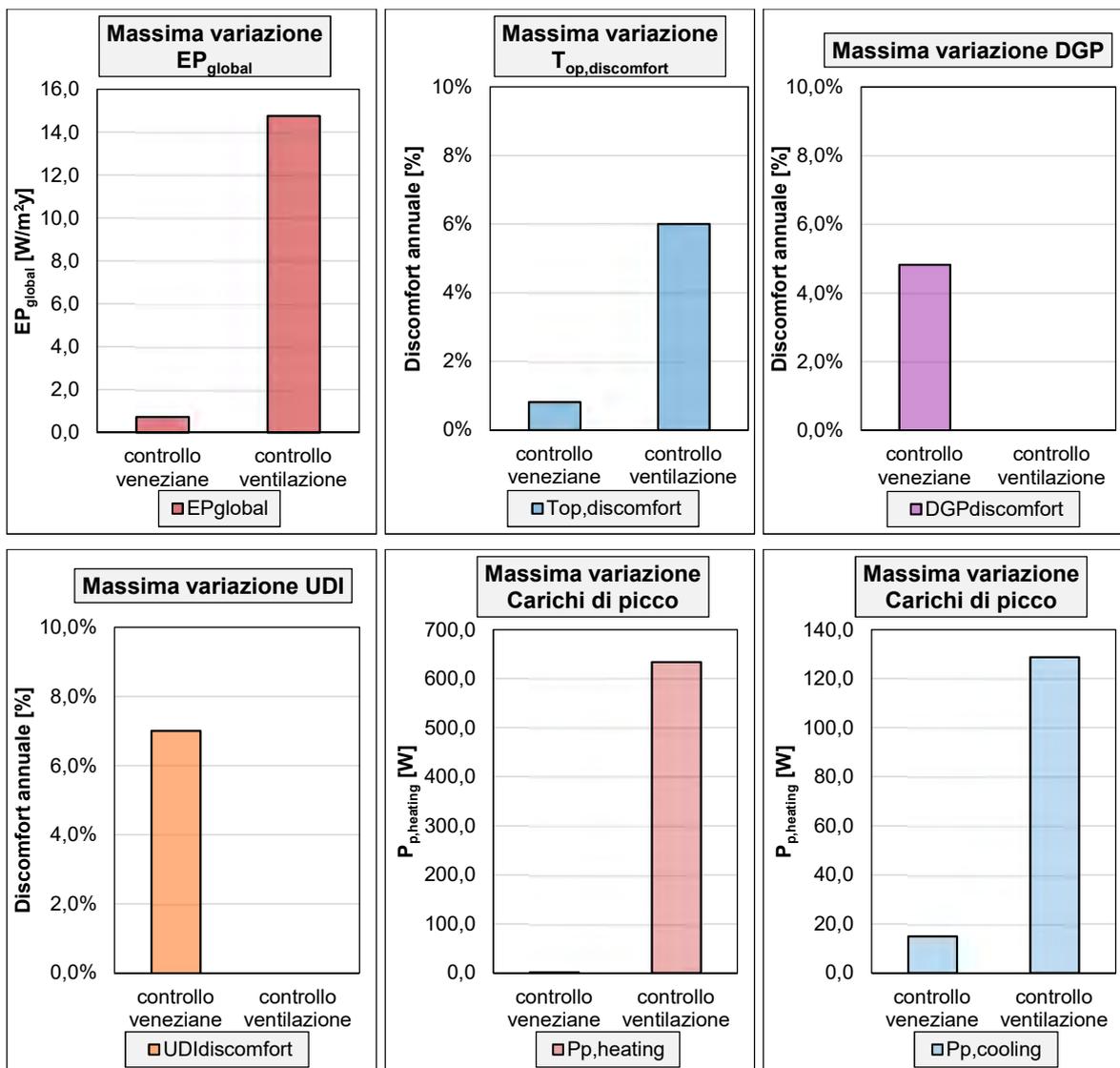


Figura 36: Massimi variazione degli indici analizzati in base ai due attuatori (veneziane e ventilazione) – Set B

#### 4.6 Conclusioni

L’indagine conferma come l’ottimizzazione della prestazione di comfort vada a discapito della prestazione energetica: obiettivo dello studio è stato ottimizzare le strategie di controllo in modo da raggiungere alte prestazioni di comfort con il minimo dispendio energetico.

Come è emerso dall’analisi dei risultati l’influenza della ventilazione sui fabbisogni energetici e sulla condizione di comfort degli occupanti è cruciale. Una cattiva gestione del suo controllo può arrivare fino a triplicare i fabbisogni energetici o a creare ambienti con scarse condizioni igieniche. In particolare nel controllo della ventilazione l’ottimizzazione delle soglie di temperatura per l’apertura della finestra in base alla posizione del caso studio è un punto fondamentale per la riduzione dei fabbisogni energetici. Anche dal punto di vista della richiesta energetica alla rete come carico di picco il controllo della ventilazione arriva fino a decuplicare tale valore. È dunque assolutamente necessario progettare con accuratezza tale controllo per equilibrare i carichi e la contemporaneità delle richieste al sistema elettrico.

Il controllo delle veneziane risulta essenziale per ridurre il discomfort visivo e ha notevole influenza sul discomfort termico. Non è invece efficace sulla riduzione dei fabbisogni energetici nel caso corrente e porta a dei miglioramenti ridotti sul discomfort da abbagliamento, a motivo dell’esposizione del caso studio indagato. Ogni tipo controllo ottimizza la prestazione nel dominio di comfort a cui appartengono i parametri con cui viene controllato: un controllo basato sul DGP elimina il discomfort da abbagliamento, mentre un

controllo basato sugli illuminamenti orizzontali ottimizza l'illuminamento sul piano di lavoro. Questo a discapito delle prestazioni negli altri domini. Per elaborare strategie efficaci occorre inserire nel processo decisionale un controllo sul dominio di comfort di interesse. In particolare risulta essenziale considerare abbagliamento e illuminamenti orizzontali.

Dallo studio preliminare sui risultati conseguenti all'introduzione di un impianto di raffrescamento estivo inoltre si può evincere come sia necessario progettare il controllo considerando la tipologia di impianto esistente per identificare parametri di controllo adeguati.

Nel caso studio esaminato la strategia Rule-based basata sugli illuminamenti porta a buone prestazioni in tutti gli ambiti di comfort esaminati. Una strategia di questo può essere integrata in un caso reale con l'utilizzo di un sensore di illuminamento.

Tuttavia l'introduzione di un controllo Model-based basato su una funzione di costo che consideri anche gli altri parametri di comfort consente di raggiungere prestazioni migliori, in particolare dal punto di vista dell'abbagliamento, ma anche dal punto di vista energetico – benchè nel caso corrente le variazioni siano minime a causa dell'esposizione. A seconda dei pesi che vengono dati alla funzione di costo cambia l'efficacia del controllo dei vari parametri, e il fabbisogno energetico della strategia.

A livello generale nel caso studio considerato emerge come il controllo sulle veneziane sia efficace per minimizzare il discomfort visivo e termico, mentre le variazioni su fabbisogno energetico dipendenti da tale controllo risultano essere trascurabili. Il discomfort termico, i livelli di CO<sub>2</sub> interni all'ambiente e la prestazione energetica sono invece notevolmente influenzate dal controllo sulla ventilazione, e in particolare le variazioni di fabbisogni energetici dovuti al controllo dell'apertura della finestra arrivano a essere 15 volte tanto quelle date dal controllo delle veneziane (17.1 kWh/m<sup>2</sup>a vs 1.1 kWh/m<sup>2</sup>a).

Per quanto riguarda i modelli utilizzati dalle strategie di controllo dall'indagine emerge che quelli maggiormente efficaci sono i modelli closed-loop che utilizzano i parametri interni utilizzati come indici di valutazione. In particolare i modelli che utilizzano i valori di illuminamento interno, abbagliamento dell'occupante e i livelli di CO<sub>2</sub> in ambiente sono i più efficaci nell'ottimizzare il proprio ambito di comfort, in questo caso visivo e di qualità dell'aria. Per raggiungere alte prestazioni sui diversi domini sembra dunque necessario considerare i parametri interni, ottenuti mediante modelli o sensori presenti in campo. In particolare è stato verificato come per l'ottimizzazione della qualità dell'aria l'introduzione di un sensore di CO<sub>2</sub> nei modelli incrementi in modo notevole la prestazione in tale ambito.

Lo sviluppo di controlli Model-based da integrare nel processo decisionale porta a un miglioramento su alcuni indici (in particolare sul discomfort per abbagliamento); tuttavia nel caso studio analizzato esso risulta piuttosto limitato rispetto all'applicazione di modelli Rule-based closed-loop. Occorre dunque verificare per ogni caso studio se lo sforzo modellistico e computazionale richiesto dallo sviluppo di tali modelli viene giustificato dalla riduzione del fabbisogno energetico e del discomfort dell'occupante.

L'implementabilità degli algoritmi di controllo analizzati in campo varia a seconda dei parametri di input utilizzati. I modelli Rule-based basati su controlli open loop (Temperatura esterna, schedule oraria) sono di facile applicazione in quanto basati su parametri semplici e misurabili con sensori a basso costo; i modelli Rule-based closed-loop (Temperatura interna, illuminamenti interni, CO<sub>2</sub>) possono presentare qualche difficoltà maggiore nell'implementazione: in particolare occorre studiare con accortezza il posizionamento dei sensori, soprattutto nel caso degli illuminamenti interni. Per i controlli che richiedono lo sviluppo di un modello si apre un panorama da esplorare riguardante l'integrazione di modelli semplici di calcolo o di modelli dettagliati quali quelli utilizzati nell'analisi corrente, all'interno di un BMS reale.

Come possibili sviluppi futuri può essere interessante esplorare l'implementazione e test in campo degli algoritmi sviluppati e la loro integrazione nell'edificio F40.

In una fase successiva si potrebbe inoltre considerare in modo più estensivo gli effetti dei controlli sul fabbisogno di raffrescamento estivo in modo da analizzare in modo completo la performance delle diverse strategie elaborate in termini di carichi elettrici e fabbisogni energetici.

## 5 Modelli ridotti per il controllo del comfort visivo

Le strategie di controllo model- e rule-based descritte precedentemente utilizzano come parametro di decisione relativo al comfort visivo il valore di illuminamento orizzontale su piano di lavoro ed il livello di abbagliamento dell'occupante, misurato tramite l'indice DGP. La misura di questi parametri a livello sperimentale risulta particolarmente problematica per le seguenti ragioni: i) costo dei sensori: in particolare per la misura del DGP è necessario un sensore di luminanza o una camera HDR; ii) numero di sensori necessari per effettuare una misura adeguata: maggiore è il numero degli occupanti, maggiore sarà il numero di sensori necessari per effettuare le misurazioni; iii) posizionamento dei sensori: risulta complesso integrare in campo sensori di illuminamento, in quanto spesso le attività svolte dagli occupanti interferiscono con le misurazioni. D'altra parte il calcolo dettagliato di tali valori tramite software richiede un elevato sforzo computazionale, nonché la problematica integrazione di un modello complesso in un BMS.

Sono state dunque esplorate le alternative per il calcolo di tali quantità, ed in particolare se sia possibile ricavare queste ultime indirettamente tramite modelli semplificati che facciano uso di parametri ambientali facilmente misurabili, quali la posizione solare e l'Irradianza.

Poiché il calcolo del DGP è un calcolo complesso, come indagine preliminare al posto di tale indice viene utilizzato l'illuminamento verticale sull'occhio. Vengono considerate come condizioni accettabili quelle di abbagliamento *impercettibile* e *percettibile*, pertanto il valore di soglia utilizzato è quello che determina una condizione di abbagliamento *disturbatore*, corrispondente ad un valore di DGP di 0.40 e ad un valore di illuminamento verticale sull'occhio di 3000 lx [102]. Per l'illuminamento orizzontale le strategie di controllo si basano invece sul "range di luce utile" definito per lo UDI, e in particolare mirano a ridurre il superamento della soglia superiore di 1000 lx. Dunque lo sviluppo di modelli semplificati per il calcolo dell'illuminamento mira a identificare non tanto la correttezza della stima dell'illuminamento in sé, bensì la correttezza dell'identificazione del range di illuminamento in questi due casi (maggiore di 3000 lx).

Il metodo semplificato indagato si basa su una correlazione lineare multivariata tra i valori di illuminamento calcolati numericamente o misurati sperimentalmente ed i valori di Irradianza globale incidente sulla facciata e di Irradianza diffusa orizzontale, assieme ai valori di Zenith e Azimut solari. Tale correlazione permette, per applicazioni reali, di stimare l'illuminamento in maniera indiretta utilizzando soltanto due sensori esterni di costo relativamente economico e posizionamento estremamente adattabile.

### 5.1 Metodologia

Per costruire la correlazione lineare multivariata è necessario un dataset rappresentativo di riferimento con i valori di illuminamento, Irradianza e posizione solare derivanti da un modello validato. Tali valori, ottenuti tramite il software Radiance per le diverse configurazioni del sistema vetrato DGU\_68/36 nell'ufficio analizzato nella sezione 4.1, sono stati confrontati con i valori di Irradianza, Azimut e Zenith del file climatico utilizzato come input per le simulazioni in Radiance.

Il valore di illuminamento in un punto è strettamente dipendente dalla posizione del punto stesso rispetto alla geometria dell'ambiente e della finestra. La correlazione va dunque costruita in modo distinto per ogni punto di cui si vuol conoscere la condizione di illuminamento. In questo caso la correlazione è stata analizzata per i 3 punti mostrati in Figura 37, e più precisamente per un punto verticale ad altezza occhio ( $E_{v\_view\_SSW}$ ) e due punti orizzontali ad altezza del piano di lavoro (0.83 m) posti a due differenti distanze dalla finestra ( $E_{wp\_near}$  – vicino alla finestra,  $E_{wp\_far}$  – lontano dalla finestra).

Il valore di illuminamento inoltre è strettamente legato alla presenza di radiazione diretta sul punto: come presentato nella Figura 39 è possibile osservare due diversi andamenti a seconda che il punto sia colpito da luce diretta e diffusa oppure dalla sola luce diffusa. Ciò rende necessario identificare se un determinato punto sia o meno irraggiato. A tale fine è necessario considerare sia se il sole, rispetto al punto considerato, si trovi in una posizione tale per cui il punto sia raggiunto da radiazione solare diretta (Figura 38), sia se il cielo sia o

meno sereno. L'identificazione dei momenti dell'anno in cui il sensore viene irraggiato direttamente permette di costruire due diverse correlazioni.

In Figura 39 è presentata la correlazione tra la radiazione globale e i valori di illuminamento per il punto  $E_{wp, near}$ . È possibile identificare due linee di tendenza: la linea di colore rosso identifica alti illuminamenti dovuti alla radiazione diretta che colpisce il sensore, mentre la linea arancione illumina bassi che si registrano sia nel caso di cielo coperto, sia perché il sole non è all'interno della cornice della finestra rispetto alla posizione del sensore considerato. L'applicazione di un filtro (dettagliato nella sezione 5.2), basato sulla posizione solare e sulla geometria dell'ambiente, consente di considerare solamente i momenti in cui il sole è direttamente visibile dal punto considerato, e pertanto la radiazione diretta può raggiungere il sensore. Osservando tale correlazione (Figura 40) è ancora possibile identificare due tendenze, dove la linea arancione identifica i punti in cui gli illuminamenti risultano essere molto bassi nonostante il sole sia direttamente visibile dal sensore. Viene applicato un secondo filtro basato sul rapporto Irradianza Diffusa/Irradianza Globale al fine di identificare ed escludere i momenti in cui il cielo è nuvoloso. Sono stati studiati diversi valori di soglia per tale rapporto, dettagliati in sezione 5.2, per identificare la sensibilità dei modelli a tale valore. Osservando la Figura 41, che riporta la correlazione dopo l'applicazione di questo secondo filtro, è possibile osservare che rimangono alcuni outliers, dovuti probabilmente alle assunzioni modellistiche del metodo a 5 fasi di Radiance, mentre si può notare come non siano più presenti dati di bassa irradianza e illuminamento (alba, tramonto e giornate nuvolose).

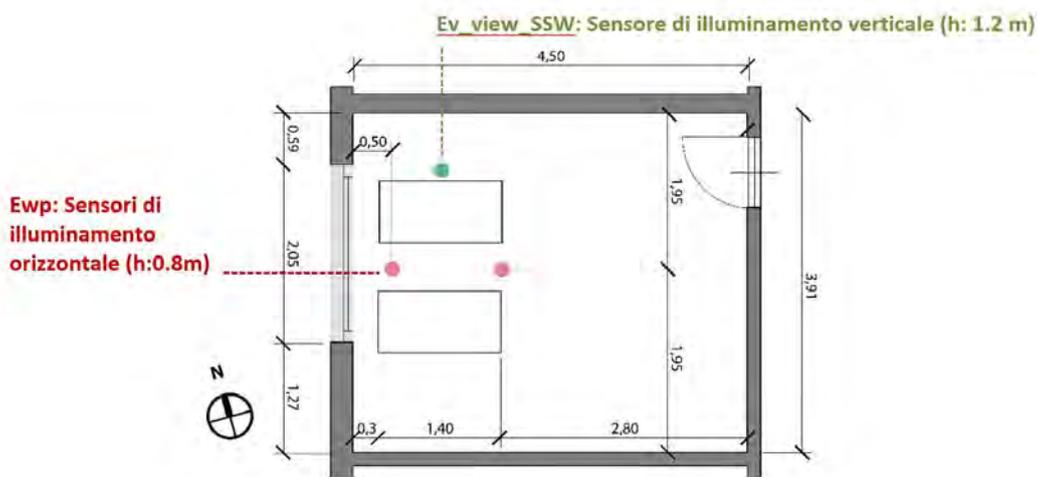


Figura 37: Posizione dei sensori di illuminamento nell'ufficio

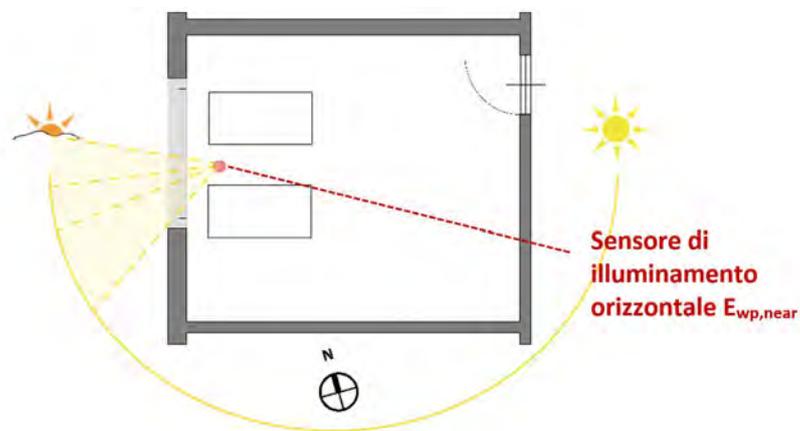


Figura 38: Radiazione diretta per geometria solare

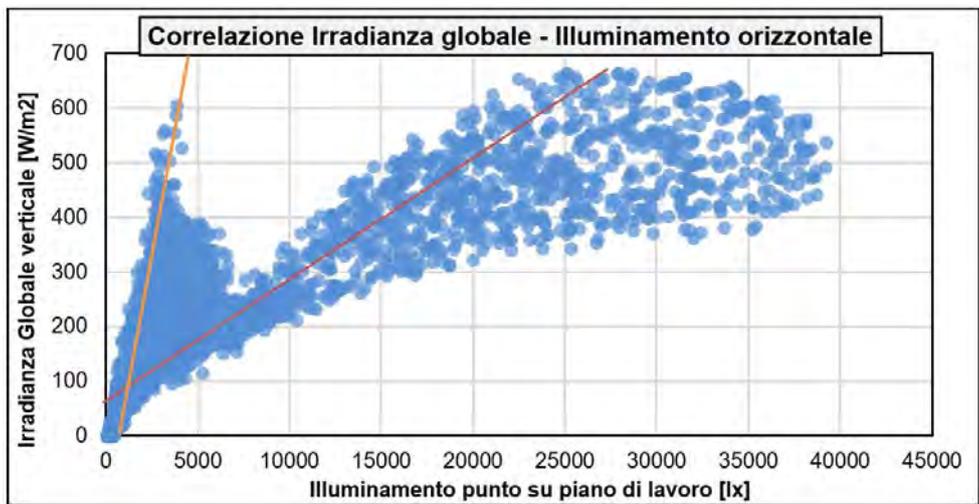


Figura 39: Correlazione Irradianza globale - Illuminamento orizzontale – assenza di filtri

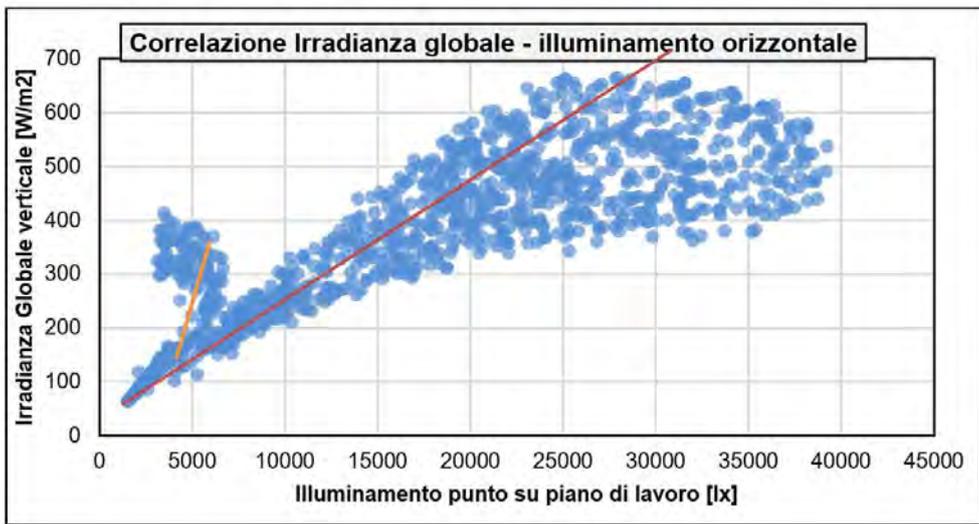


Figura 40: Correlazione Irradianza globale - Illuminamento orizzontale – filtro geometrico

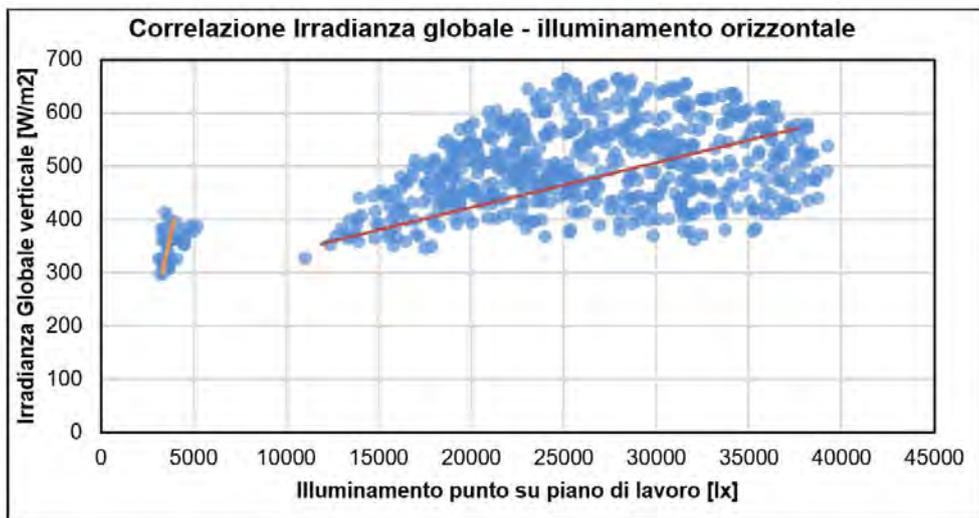


Figura 41: Correlazione Irradianza globale - Illuminamento orizzontale – filtro geometrico e di nuvolosità

Una volta diviso opportunamente il dataset si procede effettuando una correlazione lineare multivariata con intercetta a 0 nei due casi differenti:

- Modello radiazione diretta (MOD\_dir): presenza di radiazione diretta sul sensore. In questo caso i dati di illuminamento vengono correlati ai dati di Irradianza globale Verticale, Azimuth e Zenith.
- Modello radiazione diffusa (MOD\_diff): presenza di radiazione diffusa sul sensore. In questo caso i dati di illuminamento vengono correlati ai dati di Irradianza diffusa, Azimuth e Zenith.

Applicando la funzione ottenuta ai dati di Azimuth, Zenith, Irradianza Globale Verticale ed Irradianza Diffusa è infine possibile stimare tramite il modello di correlazione il valore di Illuminamento per il punto considerato.

La logica utilizzata per la costruzione del modello semplificato per il calcolo degli illuminamenti è la seguente:

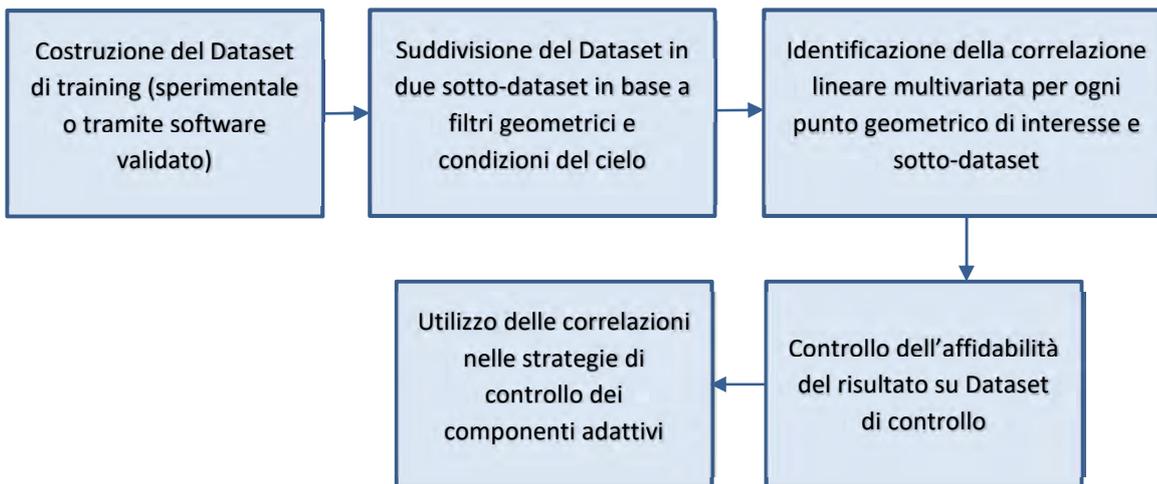


Figura 42: logica di costruzione del modello di correlazione multivariata

## 5.2 Data set classification

Al fine di ottimizzare la regressione multivariata, come detto, sono stati utilizzati due modelli differenti, a seconda che il sensore fosse o meno colpito da radiazione solare diretta. È stato quindi necessario suddividere il database degli illuminamenti in due sotto-database, in modo da raggruppare tutti i momenti in cui i punti considerati fossero o meno irradiati direttamente. Per fare questo ci si è serviti di due differenti filtri, uno relativo alla condizione di cielo, e l'altro di carattere geometrico. Tramite la combinazione di tali filtri è stato quindi possibile definire se l'illuminamento su un punto in un determinato istante fosse determinato dalla sola componente diffusa della radiazione oppure dall'effetto combinato di radiazione diretta e diffusa.

Il primo filtro, relativo alla condizione di cielo, ha lo scopo di identificare se quest'ultimo sia o meno coperto. Come mostrato nel capitolo 4, nel controllare la veneziana tramite la strategia *CutOff* lo stesso risultato era ottenuto considerando il parametro *clearness index*, il quale, al di sotto di 1.2 indica che il cielo è del tutto coperto. Non essendo possibile utilizzare in questa sede tale parametro, il cui calcolo richiede dati di input difficili da misurare in-situ, si è scelto di utilizzare come parametro il rapporto tra radiazione diffusa orizzontale e radiazione globale orizzontale ( $I_{diff}/I_{glob}$ ). Al fine di determinare quale valore di soglia utilizzare per questo parametro, sono stati analizzati i valori minimi e massimi di radiazione diretta normale per ogni valore di *clearness index* e di  $I_{diff}/I_{glob}$  per l'anno tipo per la città di Roma (IWEC) [82] (cfr. Figura 43).

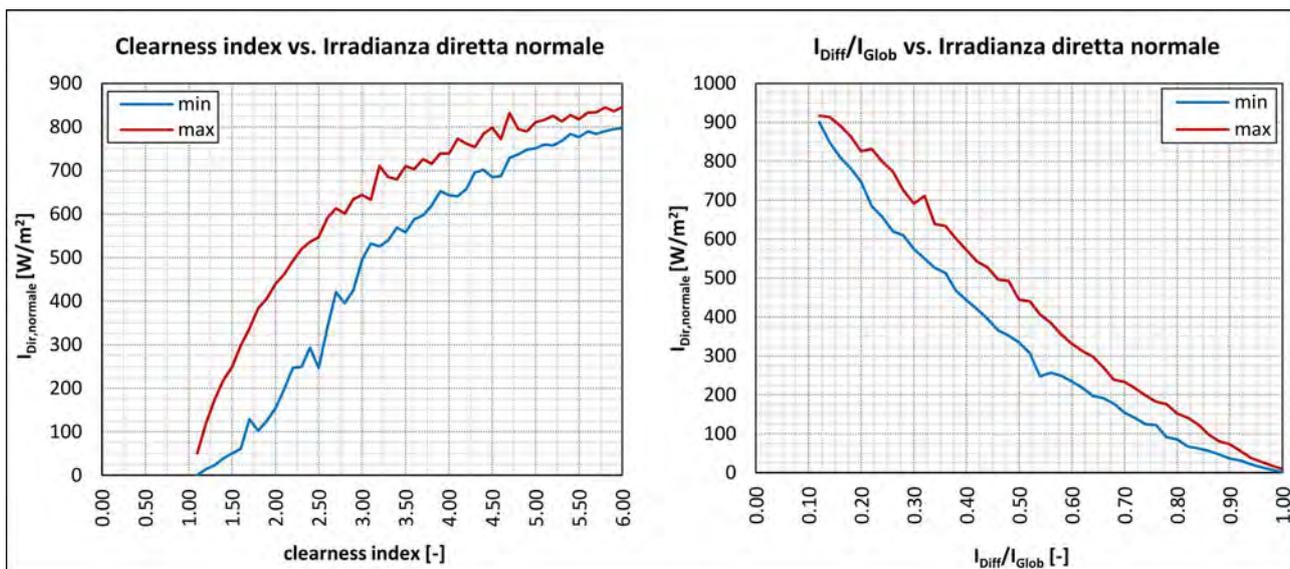


Figura 43. Valori minimi e massimi di irradianza diretta normale per i diversi valori di clearness index (sinistra) e I<sub>diff</sub>/I<sub>glob</sub> (destra) per l’anno tipo della città di Roma (IWEC) [82]

Per un valore di clearness index di 1.2 si nota che la radiazione solare diretta normale massima registrata per Roma equivale a 119 W/m<sup>2</sup>; lo stesso valore, inteso però come valore minimo, si registra a Roma per un I<sub>diff</sub>/I<sub>glob</sub> pari a 0.74: tale valore è stato quindi utilizzato come soglia per il parametro I<sub>diff</sub>/I<sub>glob</sub>. Al fine di verificare la sensibilità dei modelli di regressione multipla a questo indice, altre tre soglie sono poi state considerate, determinate a partire dal valore di radiazione diretta normale di 119 W/m<sup>2</sup> aumentato di 50 W/m<sup>2</sup> e 100 W/m<sup>2</sup> e diminuito di 50 W/m<sup>2</sup>. La Tabella 24 riassume i diversi valori di I<sub>diff</sub>/I<sub>glob</sub> considerati ed i valori di irradianza diretta normale minimi per i quali essi sono stati determinati.

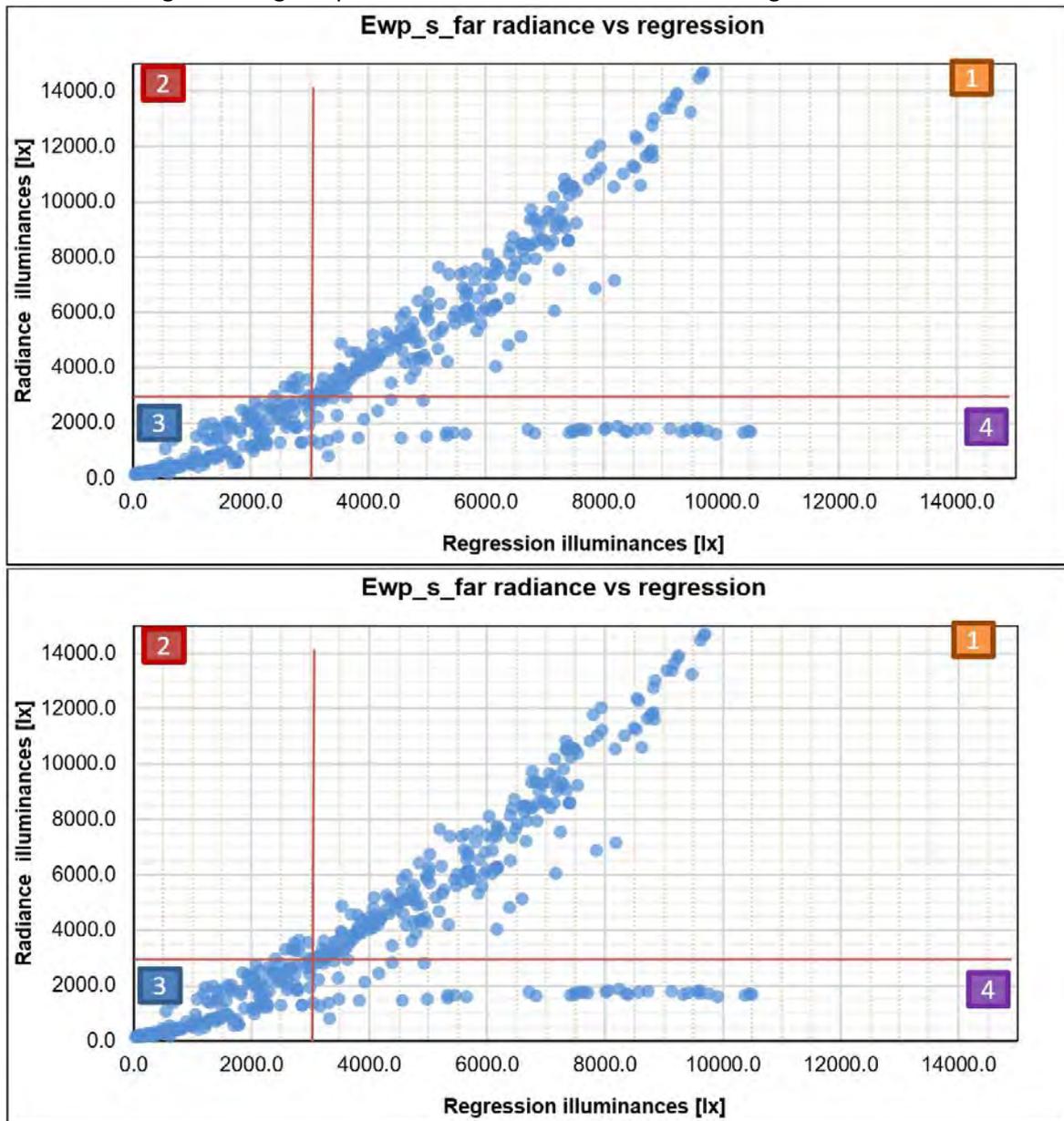
Tabella 24. parametri di radiazione utilizzati per la costruzione del filtro condizione cielo

	ip_0	ip_1	ip_2	ip_3	ip_4
<b>Clearness index</b>	/	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>I<sub>dir, normale</sub></b>	/	60	119	160	210
<b>I<sub>diff</sub>/I<sub>glob</sub></b>	/	0.85	0.77	0.695	0.625

Per quanto riguarda il filtro geometrico, questo è stato sviluppato sulla base della necessità di determinare quando il sole fosse direttamente “visibile” dai differenti sensori considerati attraverso la finestra. Disponendo delle caratteristiche geometriche della finestra dell’ufficio e delle sole coordinate di azimut e zenit solari, si è deciso di procedere determinando, in un sistema di coordinate sferica con origine nel punto considerato, le equazioni sferiche dei differenti spigoli del telaio della finestra e dell’imbotte. Ovviamente, essendo il sistema di riferimento centrato sul punto in esame, le equazioni di tali spigoli variano per ogni sensore considerato. Essendo l’azimut e lo zenit di fatto le coordinate sferiche della posizione del sole nello spazio, è quindi possibile verificare se questi ultimi, per ogni istante dell’anno, siano all’interno del rettangolo (sferico) determinato dai 4 spigoli limite (telaio o imbotte a seconda della posizione del punto). Combinando il filtro relativo alla condizione di cielo ed il filtro geometrico è stato infine possibile determinare due differenti database di illuminamenti, uno in cui è presente la componente diretta della radiazione solare, ed uno in cui invece l’illuminamento è determinato dalla sola componente diffusa.

### 5.3 Risultati

Vengono di seguito presentati i risultati relativi all'analisi sugli illuminamenti.



**Figura 44: Indagine epidemiologica illuminamenti dei modelli e di Radiance**

**Tabella 25: Indici statistici calcolati per i modelli in tre punti e con differenti configurazioni**

In Tabella 25 si possono leggere gli indici di accuratezza risultanti dalle indagini sui diversi modelli sviluppati. Nei risultati vengono presentati i dati relativi ai modelli:

- i) ip\_0, che utilizza solo il filtro sulla geometria solare per dividere i dati tra i modelli di diffusa e globale;
- ii) ip\_1, che utilizza la geometria solare e in aggiunta il filtro basato sul rapporto tra radiazione diffusa e globale con limite 0.85;

- iii) ip\_4, che utilizza la geometria solare e in aggiunta il filtro basato sul rapporto tra radiazione diffusa e globale con limite 0.625.

I risultati vengono analizzati utilizzando l'approccio epidemiologico, identificando le percentuali di veri positivi, falsi positivi, falsi negativi e veri negativi nel confronto tra i valori restituiti da Radiance e dai modelli di correlazione.

In Figura 44 si possono osservare in ordinata i valori di illuminamenti calcolati da Radiance e in ascissa i valori di illuminamento calcolati con i modelli di correlazione. Noto il valore di soglia di 3000 lx, utilizzato nelle strategie di controllo dei componenti adattivi, è possibile suddividere il grafico in quattro quadranti. I punti che si trovano all'interno dei quadranti hanno le seguenti caratteristiche:

$$- \text{ Quadrante [1]: Veri Positivi (TP) } \begin{cases} E_{Radiance} > 3000 \text{ lx} \\ E_{Regr} > 3000 \text{ lx} \end{cases} \quad (5.1)$$

Il modello identifica i momenti in cui la misura reale è maggiore di 3000 lx.

$$- \text{ Quadrante [2]: Falsi Negativi (FN) } \begin{cases} E_{Radiance} > 3000 \text{ lx} \\ E_{Regr} \leq 3000 \text{ lx} \end{cases} \quad (5.2)$$

Il modello identifica un valore di illuminamento minore di 3000 lx mentre la misura reale è maggiore di 3000 lx. Basarsi sul modello può dunque provocare una situazione di discomfort visivo.

$$- \text{ Quadrante [3]: Veri Negativi (TN) } \begin{cases} E_{Radiance} \leq 3000 \text{ lx} \\ E_{Regr} \leq 3000 \text{ lx} \end{cases} \quad (5.3)$$

Il modello identifica i momenti in cui la misura reale è minore di 3000 lx.

$$- \text{ Quadrante [4]: Falsi Positivi (FP) } \begin{cases} E_{Radiance} \leq 3000 \text{ lx} \\ E_{Regr} > 3000 \text{ lx} \end{cases} \quad (5.4)$$

Il modello identifica un valore di illuminamento maggiore di 3000 lx, mentre la misura reale è minore di 3000 lx. Il modello sovrastima il dato ma questo non implica il rischio di generare discomfort visivo.

In cui  $E_{Radiance}$  ed  $E_{Regr}$  sono rispettivamente gli illuminamenti calcolati tramite Radiance e stimati dal modello di regressione multivariata.

Il caso problematico per l'utilizzo dei modelli di correlazioni nelle logiche di controllo di componenti adattivi risulta essere quello afferente al quadrante [2], dove il modello di correlazione restituisce valori inferiori a 3000 lx mentre nella realtà essi sono maggiori di tale soglia, determinando quindi situazioni di visual discomfort non rilevate.

In Tabella 25 sono riportati la percentuale di falsi negativi sui dati totali del Dataset di controllo e i valori di  $R^2$  ottenuti per ogni dataset indagato. A seconda della posizione del punto indagato cambia il valore di  $R^2$  e dunque la correttezza della stima del parametro. Tuttavia a un  $R^2$  più basso non è per forza associato una percentuale di falsi negativi maggiore, in quanto tale valore identifica l'accuratezza della stima e non la correttezza dell'identificazione del range di illuminamento. Per valutare l'efficacia del modello dunque occorre concentrarsi sulla percentuale di falsi negativi rispetto alle osservazioni totali. Anche tale indice non indica in modo assoluto l'accuratezza del modello, poiché è dipendente dal numero di momenti nell'anno in cui vengono superati i 3000 lx sul sensore, per illuminamento diffuso o radiazione diretta: nel caso in cui sia presente una veneziana con lamelle parzialmente inclinati il sensore sarà raramente raggiunto da radiazione diretta, e raramente supererà i 3000 lx di illuminamento. Qualora dunque il modello sbagli nell'identificazione di tali momenti la percentuale di falsi negativi sarà comunque bassa. Per questo motivo viene successivamente introdotta un'analisi mediante la Receiver Operating Characteristic curve.

In assenza di veneziana il valore di  $R^2$  risulta variabile: in alcune stime si raggiunge appena il 36%. Per il punto verticale Ev\_view\_SSW la percentuale annuale di falsi negativi varia tra lo 1.8 e il 2.8%. il modello con prestazione migliore è ip\_0. Per il punto orizzontale Ewp\_s\_far i tre modelli funzionano molto bene e la

percentuale annuale di falsi negativi varia tra lo 0.1 e lo 0.2%. Per il punto orizzontale Ewp\_s\_near la percentuale annuale di falsi negativi varia tra lo 0.9 e lo 4.5%. In questo caso l'introduzione di un filtro sulle condizioni del cielo migliora le prestazioni dei modelli riducendo notevolmente i falsi negativi. Il modello che funziona meglio è l'ip\_4.

Con veneziana a 0° il valore di R<sup>2</sup> è variabile e in alcuni casi raggiunge appena il 36%. Le percentuali di falsi negativi sono basse, variando per tutti i punti e i modelli tra lo 0.6 e l'1% annuale. Questo è dovuto tuttavia al numero ridotto di osservazioni con valore di illuminamento superiore ai 3000 lx.

Con veneziana a 30° il valore di R<sup>2</sup> varia tra il 61 e il 91%; i modelli relativi alla radiazione diffusa si dimostrano molto accurati, con R<sup>2</sup> sempre superiori all'88%. Le percentuali di falsi negativi sono molto basse per tutti i punti e variano tra lo 0.0 e lo 0.1% annuale. Anche in questo caso tale valore è dovuto al numero ridottissimo di osservazioni con valore di illuminamento superiore ai 3000 lx.

Con veneziana a 75° il valore di R<sup>2</sup> è superiore all'84% in tutti i casi: i modelli risultano molto accurati e con percentuali di falsi negativi pari allo 0% perché la chiusura della veneziana impedisce che il sensore sia raggiunto direttamente dal sole, dunque sono estremamente rari i momenti in cui l'illuminamento misurato da software validato supera i 3000 lx.

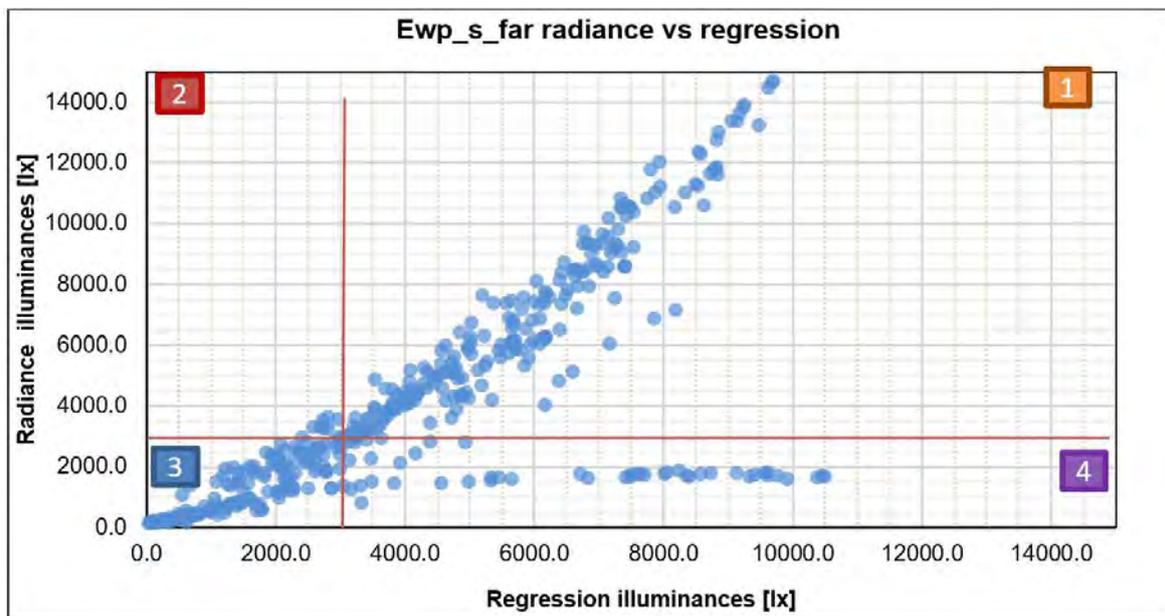


Figura 44: Indagine epidemiologica illuminamenti dei modelli e di Radiance

Tabella 25: Indici statistici calcolati per i modelli in tre punti e con differenti configurazioni

Configurazione veneziana	modello	Ev_view_SSW			Ewp_s_far			Ewp_s_near		
		FN [2]	R <sup>2</sup> <sub>MOD_dir</sub>	R <sup>2</sup> <sub>MOD_diff</sub>	FN [2]	R <sup>2</sup> <sub>MOD_dir</sub>	R <sup>2</sup> <sub>MOD_diff</sub>	FN [2]	R <sup>2</sup> <sub>MOD_dir</sub>	R <sup>2</sup> <sub>MOD_diff</sub>
Assente	ip_0	1.8%	73%	79%	0.1%	83%	83%	4.5%	92%	65%
	ip_1	2.2%	78%	77%	0.1%	84%	81%	2.1%	93%	64%
	ip_4	2.8%	50%	74%	0.2%	55%	79%	0.9%	36%	57%
Inclinazione 0°	ip_0	0.6%	73%	88%	0.8%	54%	86%	1.0%	40%	46%
	ip_1	0.8%	81%	85%	0.8%	55%	85%	1.0%	38%	49%
	ip_4	0.7%	82%	82%	0.8%	55%	83%	0.9%	36%	49%

Inclinazione 30°	ip_0	0.1%	62%	91%	0.0%	71%	89%	0.0%	99%	91%
	ip_1	0.1%	63%	89%	0.0%	71%	88%	0.0%	100%	91%
	ip_4	0.1%	62%	89%	0.0%	70%	88%	0.0%	100%	91%
Inclinazione 75°	ip_0	0.0%	99%	90%	0.0%	99%	85%	0.0%	99%	89%
	ip_1	0.0%	100%	88%	0.0%	100%	84%	0.0%	100%	89%
	ip_4	0.0%	100%	88%	0.0%	100%	84%	0.0%	100%	89%

In questa sezione i risultati vengono analizzati con il metodo della ROC (Receiver Operating Characteristic) curve. Essa rappresenta graficamente l'accuratezza dei risultati di un modello tramite i seguenti parametri:

- TPR = True Positive Rate = True Positives/( True Positives + False Negatives) = momenti in cui il modello identifica correttamente un valore maggiore di 3000 lx / momenti in cui l'illuminamento reale è maggiore di 3000 lx. Identifica la percentuale di accuratezza sopra i 3000 lx.
- TNR = True Negative Rate = True Negatives/(True Negatives + False Positives) = momenti in cui il modello identifica correttamente un valore minore di 3000 lx / momenti totali in cui l'illuminamento reale è minore di 3000 lx. Identifica la percentuale di accuratezza sotto i 3000 lx.
- 1-TNR = complementare del TNR, identifica la percentuale di errore sotto i 3000 lx.

Più il modello è accurato, più il valore di TPR è vicino a 1 e il valore di 1-TNR è vicino a 0. In questo studio, poiché le veneziane sono controllate nel momento in cui nel punto considerato viene superato il valore di 3000 lx, risulta conveniente che il TPR sia vicino a 1, ovvero che il modello identifichi correttamente i momenti in cui viene superato il valore di soglia. Come altro indice di accuratezza del modello è stato utilizzato lo Youden index (J), derivato dall'equazione sottostante.

$$J = \frac{\text{True Positives}}{\text{True positives} + \text{False negatives}} + \frac{\text{True Negatives}}{\text{True Negatives} + \text{False Positives}} - 1 \quad (5.5)$$

Tale indice dà lo stesso peso alle occorrenze di falsi positivi e falsi negativi, per cui per tutti i test con lo stesso risultato per questa metrica si ha la stessa proporzione di risultati non classificati correttamente. Nel caso ottimale, cioè di una classificazione perfetta, il suo valore è pari a 1.

Dai grafici in Figura 45 è possibile confrontare l'accuratezza dei modelli relativi alla configurazione senza veneziane. Il modello più accurato non è univoco, bensì cambia a seconda del punto e della configurazione delle veneziane: esso risulta essere ip\_0 per il punto verticale, ip\_1 per il punto orizzontale lontano dalla finestra e ip\_4 per il punto orizzontale vicino alla finestra.

Dai grafici in Figura 46 è possibile verificare come l'unico modello che presenta una buona accuratezza per la configurazione con veneziane a 0° sia il modello con filtro su geometria solare per il punto verticale. In tutti gli altri casi il modello non riesce a identificare il passaggio del sole attraverso le lamelle, dovuto alla geometria complessa del problema e dunque il valore di TPR risulta molto basso. Nelle altre due configurazioni analizzate (30° e 75°) non si trova nessun caso o pochissimi casi in cui l'illuminamento sia superiore a 3000 lx e dunque l'indagine epidemiologica non dà informazioni adeguate sull'accuratezza dei risultati. In Tabella 26 si leggono gli indici relativi all'indagine, dove il simbolo "/" identifica l'assenza di punti sopra i 3000 lx.

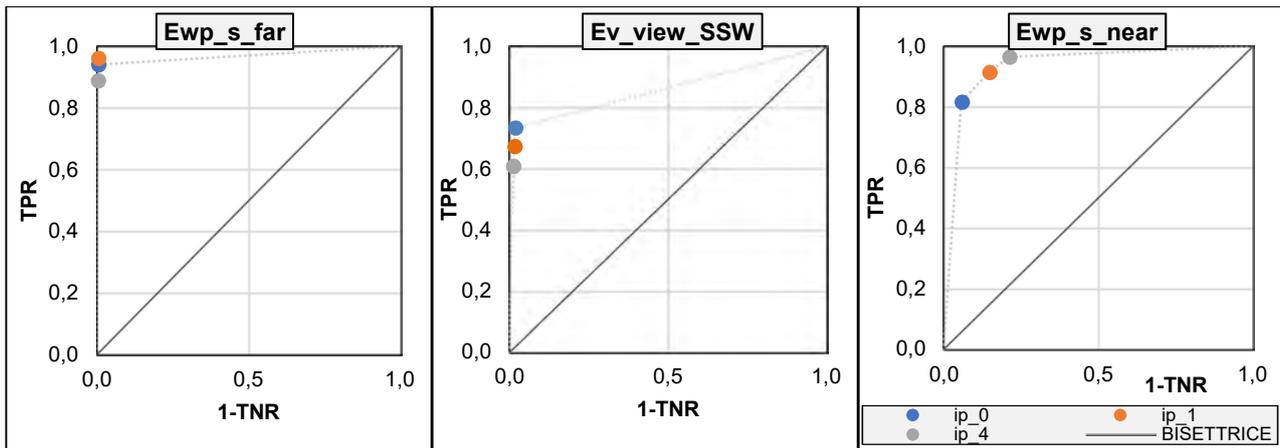


Figura 45: ROC curve configurazione in assenza di veneziane

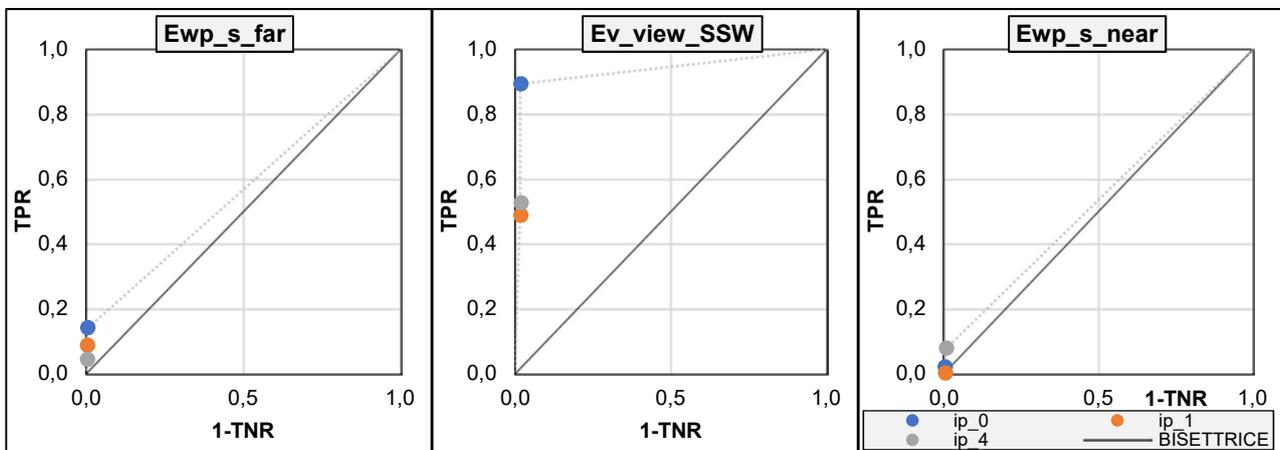


Figura 46: ROC curve veneziane a 0°

Tabella 26: Indici ROC curve per tutte le configurazioni e modelli

Configurazione veneziana	modello	Ev_view_SSW			Ewp_s_far			Ewp_s_near		
		TPR	TNR	J	TPR	TNR	J	TPR	TNR	J
Assente	ip_0	0.7	1.0	0.7	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8
	ip_1	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8
	ip_4	0.6	1.0	0.6	0.9	1.0	0.9	1.0	0.8	0.8
Inclinazione 0°	ip_0	0.9	1.0	0.9	0.1	1.0	0.1	0.0	1.0	0.0
	ip_1	0.5	1.0	0.5	0.1	1.0	0.1	0.0	1.0	0.0
	ip_4	0.5	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.1	1.0	0.1
Inclinazione 30°	ip_0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	/	1.0	/
	ip_1	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	/	1.0	/
	ip_4	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	/	1.0	/
Inclinazione 75°	ip_0	/	1.0	/	/	1.0	/	/	1.0	/
	ip_1	/	1.0	/	/	1.0	/	/	1.0	/
	ip_4	/	1.0	/	/	1.0	/	/	1.0	/

#### 5.4 Conclusioni, limitazioni, future work

In conclusione si può affermare che il modello semplificato per il calcolo degli illuminamenti orizzontali può essere utilizzato in assenza di veneziana o nel caso in cui le lamelle abbiano angolo di inclinazione maggiore

o uguale a 30°. Negli altri casi la geometria complessa delle lamelle fa in modo che i modelli non siano in grado di identificare correttamente i momenti in cui per il punto preso in esame si registra un valore di illuminamento superiore a 3000 lx.

In assenza di veneziana non è possibile scegliere un modello univoco dal funzionamento ottimale. In generale il modello basato sul rapporto Irradianza diffusa/Irradianza globale = 0.85 restituisce risultati accettabili in tutti i casi. Nel caso di veneziane con inclinazione maggiore o uguale a 30° i modelli sono equivalenti, dunque il filtro basato sulla geometria solare è sufficiente a restituire risultati accurati.

L'utilizzo di questi modelli per i casi citati precedentemente in un caso reale permette di calcolare con buona accuratezza i valori di illuminamento da variabili esterne facilmente misurabili, dunque può essere facilmente integrato in un BMS. Tuttavia, l'applicazione di tali modelli richiede comunque uno sforzo modellistico precedente per estrapolare le funzioni di correlazione che verranno applicate in loco, dato che lo sviluppo dei modelli è strettamente legato alla posizione, all'esposizione e alla geometria di caso studio.

Uno studio maggiormente esteso ed accurato relativo ai modelli di illuminamento potrebbe permettere il superamento di parte delle limitazioni presentate precedentemente.

## 6 Controllo avanzato di vetri dinamici nel sistema sperimentale TWINS

### 6.1 Finalità e metodologia

Obiettivo di questa sezione è la descrizione dell'attività di ricerca condotta sulla facility sperimentale TWINS, presso il Politecnico di Torino e finalizzata alla messa a punto di una infrastruttura sperimentale per la verifica della fattibilità reale di un controllo Model Predictive (MPC) su di una tecnologia di involucro trasparente per il controllo della radiazione solare in ambiente (quale una facciata integrante vetrate elettrocromiche). Seppure non completamente rappresentativi i risultati ottenuti, date alcune caratteristiche della facility, si è tuttavia testato l'intero processo, valutandone l'efficacia e gli effetti sull'ambiente interno (occupanti) e sui sistemi energetici (carichi di picco e fabbisogno di energia).. Data la natura innovativa del controllo e la necessità di poter essere implementabile su un ambiente completamente controllabile e misurato, si è utilizzato il sistema di cella sperimentale in ambiente esterno TWINS (Testing Window Innovative Systems), presso il Politecnico di Torino (di seguito descritta).

In particolare l'attività si è svolta nelle seguenti fasi (dettagliate nelle sezioni seguenti):

- a. Upgrade del sistema sperimentale TWINS con vetri elettrocromici e relativa automazione;
- b. Upgrade del sistema di monitoraggio e controllo per permettere l'acquisizione e la visualizzazione in tempo reale di:
  - i. dati e forecast metereologici (da servizi meteo a pagamento) sulle condizioni ambientali esterne;
  - ii. misure di temperatura, flussi termici, radiazione solare e luminosa dell'ambiente interno;
  - iii. controllo della radiazione solare entrante attraverso i vetri elettrocromici e della temperatura ambiente attraverso un radiatore in ambiente.
- c. Costruzione, validazione ed uso di modelli fisici che replichino il comportamento fisico dell'ambiente TWINS (termico e di luce naturale), che in tempo reale permettano:
  - a. la previsione di variabili ambientali (e relative al benessere dell'occupante) non direttamente misurate in campo;
  - b. la previsione dell'effetto di azioni di controllo alternative sulle variabili di cui sopra;
  - c. l'ottimizzazione di azioni di controllo rispetto a tale previsione.
- d. L'implementazione ed il test di un "decisore" in campo, per il controllo predittivo dei vetri elettrocromici che consideri diverse funzioni obiettivo (minimizzazione del fabbisogno energetico, minimizzazione del discomfort termico e massimizzazione del daylight);
- e. Il confronto simulativo tra il suddetto "decisore" e controlli euristici (stato dell'arte), per valutarne l'efficacia e le performance in modo comparativo.

In particolare per svolgere queste attività, è stata cruciale l'attività riassunta nei punti b) e c), che si è tradotta nella realizzazione di una Digital Twin del sistema sperimentale TWINS adatta al caso studio in esame, ma che costituisce la base per un futuro uso di questa infrastruttura hardware - software per testare sistemi di involucro e/o di controllo innovativi.

## 6.2 Caso studio: cella TWINS e vetri dinamici

Le attività sperimentali sono state svolte presso la cella di prova A delle TWINS (Testing Window Innovative System), situata in ambiente esterno presso i laboratori del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino. La cella ha dimensioni interne 1.6 m x 3.5 m x 3 m che replicano le dimensioni di facciate tipicamente utilizzate in edifici adibiti ad ufficio. La facciata esposta a Sud è l'unica che presenta componenti trasparenti e si trova in condizioni di non ombreggiamento da elementi esterni. Il soffitto, il pavimento e le pareti sono formati da pannelli sandwich di 48 mm con doppia lamiera in acciaio e poliuretano espanso ( $0.48 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ); solo al pavimento è stato aggiunto uno strato di linoleum per garantire una superficie calpestabile ( $0.70 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ).

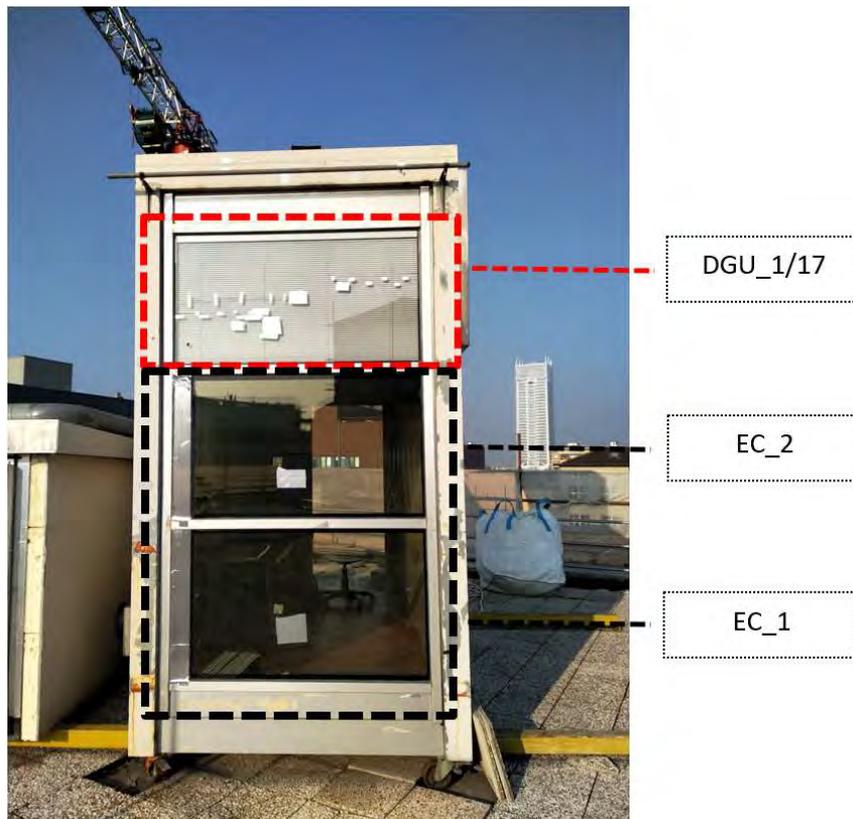


Figura 47: Apparato sperimentale TWINS

La parete esposta a Sud della cella (Figura 47) ospita una facciata modulare in cui è possibile svolgere test sperimentali su sistemi innovativi vetrati. Per il presente lavoro è stata assemblata una facciata in alluminio contenente tre IGU: la prima in alto è costituita da un doppio vetro statico con veneziana integrata nella vetrocamera, mentre le altre due (al centro e in basso) sono costituite da vetri elettrocromici, oggetto di studio di tale lavoro.

La DGU con veneziana integrata è costituita da un laminato esterno di spessore 6 mm, un'intercapedine d'aria di 29 mm con veneziana di colore grigio e un ulteriore laminato di 6 mm coatizzato con un rivestimento basso emissivo su faccia #3. Essa risulta avere un valore di trasmittanza termica pari a  $1.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Le lamelle della veneziana hanno 12.5 mm di spessore e sono distanziate di 10 mm; durante tutto il periodo di monitoraggio sono state tenute a  $70^\circ$ , con configurazione totalmente chiusa, in modo da ridurre al minimo l'influenza di questo componente sulle condizioni visive e termiche interne. I due vetri elettrocromici invece sono costituiti da un laminato esterno di 10 mm contenente lo strato elettrocromico e da un vetro chiaro interno di 8 mm con rivestimento basso emissivo su faccia #3 separati da un'intercapedine di 16 mm con Argon al 90%. I vetri elettrocromici utilizzati sono in grado di assumere tutti gli stati intermedi compresi tra lo stato più chiaro (EC0) e lo stato più scuro (EC100). Ai fini del seguente lavoro sono stati individuati 6 stati, in modo da considerare variazioni del 10% del valore del coefficiente di trasmissione solare. La DGU risulta avere un valore di trasmittanza termica pari a  $1.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . In Tabella 27 e Tabella 28 sono riportate le proprietà

termiche e ottiche rispettivamente della DGU e del vetro elettrocromico, calcolate tramite il software LBNL Window [77].

**Tabella 27: Caratteristiche sistemi vetrati apparato TWINS**

Nome	Inclinazione veneziana	$T_{vis}$ [-]	$T_{sol}$ [-]	$g$ [-]
DGU_1/17	70°	0.01	0.06	0.17
DGU_EC	NA	cf. Tabella 28		

**Tabella 28: Caratteristiche ottiche e solari dei vetri elettrocromici a diversi stati di colorazione (elaborati con il SW Window LBNL) – Stratigrafia del vetro camera**

Stato EC	% Colorazione	$T_{vis}$ [-]	$T_{sol}$ [-]	$g$ [-]
EC0	0	0.59	0.38	0.49
EC10	10	0.50	0.30	0.42
EC20	20	0.41	0.23	0.34
EC40	40	0.29	0.14	0.26
EC60	60	0.14	0.06	0.18
EC100	100	0.02	0.01	0.09

### 6.3 Sistemi di acquisizione e controllo (TWINS Building Management System)

Al fine di implementare il controllo in campo dei vetri elettrocromici, è stata sviluppata un'infrastruttura in grado di automatizzare l'acquisizione dei dati relative alle condizioni della cella, l'implementazione di un algoritmo di controllo e il controllo degli attuatori in campo (vetri elettrocromici, riscaldatore elettrico).

L'infrastruttura riprende la struttura tipica di un Building Management System con la divisione in 3 livelli differenti schematizzati in Figura 48:

- Field layer: comprende tutti gli elementi necessari al monitoraggio e controllo del sistema. Appartengono, dunque, a tale layer i sensori e gli attuatori della TWINS indispensabili per l'implementazione del controllo dei vetri elettrocromici (sistema DAQ, dati climatici, controllore locale dei vetri adattivi);
- Automation layer: comprende tutte le operazioni preliminari necessarie per implementare l'algoritmo di controllo, come ad esempio la sincronizzazione di tutti i dati provenienti dal field layer, il post processing degli stessi e infine la visualizzazione tramite apposita dashboard;
- Decision-making layer: comprende tutte le operazioni computazionali effettuate dall'algoritmo di controllo, è il cuore di tutta l'infrastruttura e richiede un più alto costo computazionale rispetto agli altri layer.

La comunicazione tra i vari layer è essenziale per lo scambio di dati ed informazioni tra i vari sistemi; nel caso specifico la comunicazione tra il field layer e l'automation layer è stato gestito tramite il protocollo File Transfer Protocol (FTP): tutti i dati provenienti dal field layer vengono automaticamente salvati su una cartella condivisa in rete e scaricati dall'automation layer per le analisi.

per ogni Time step t

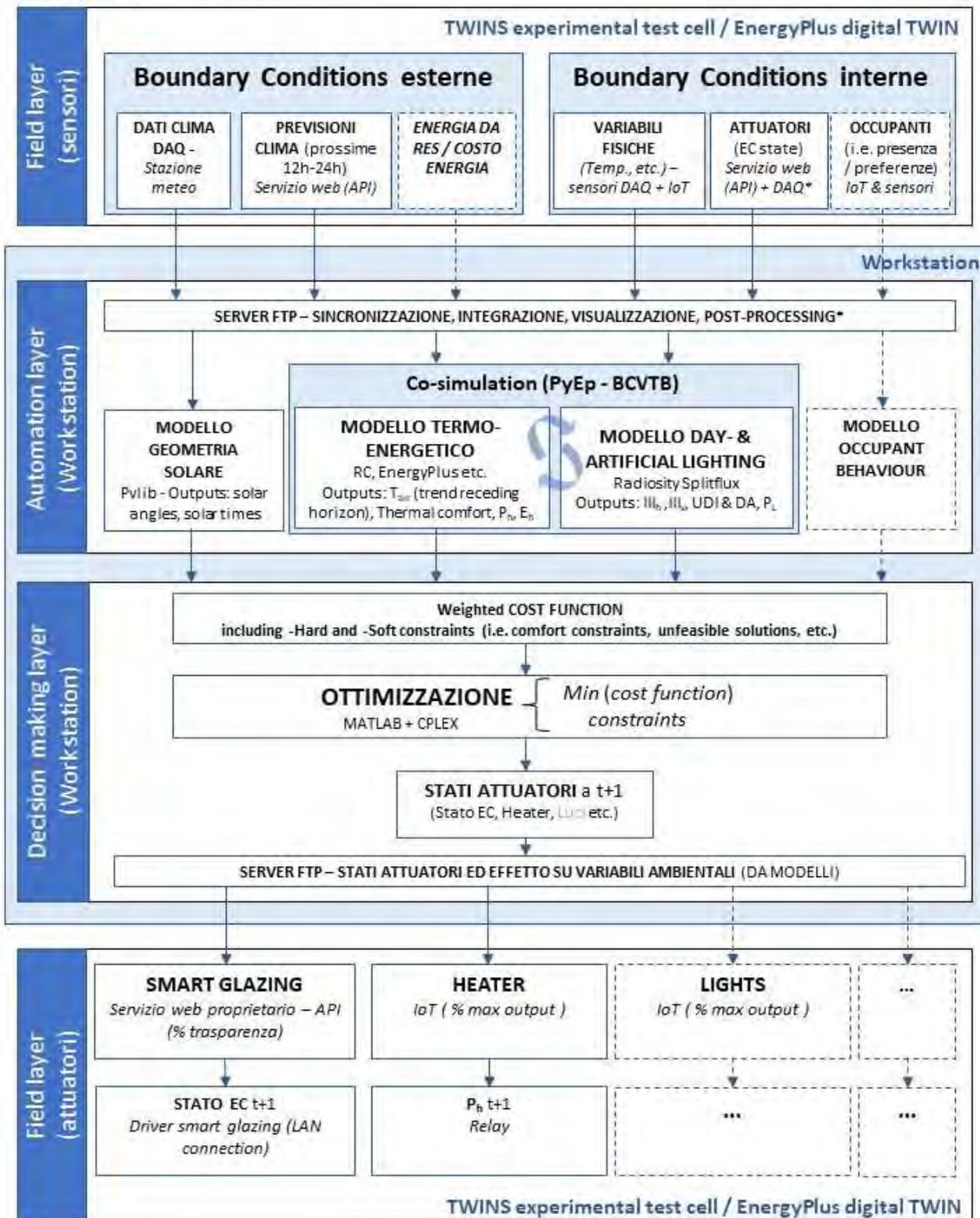
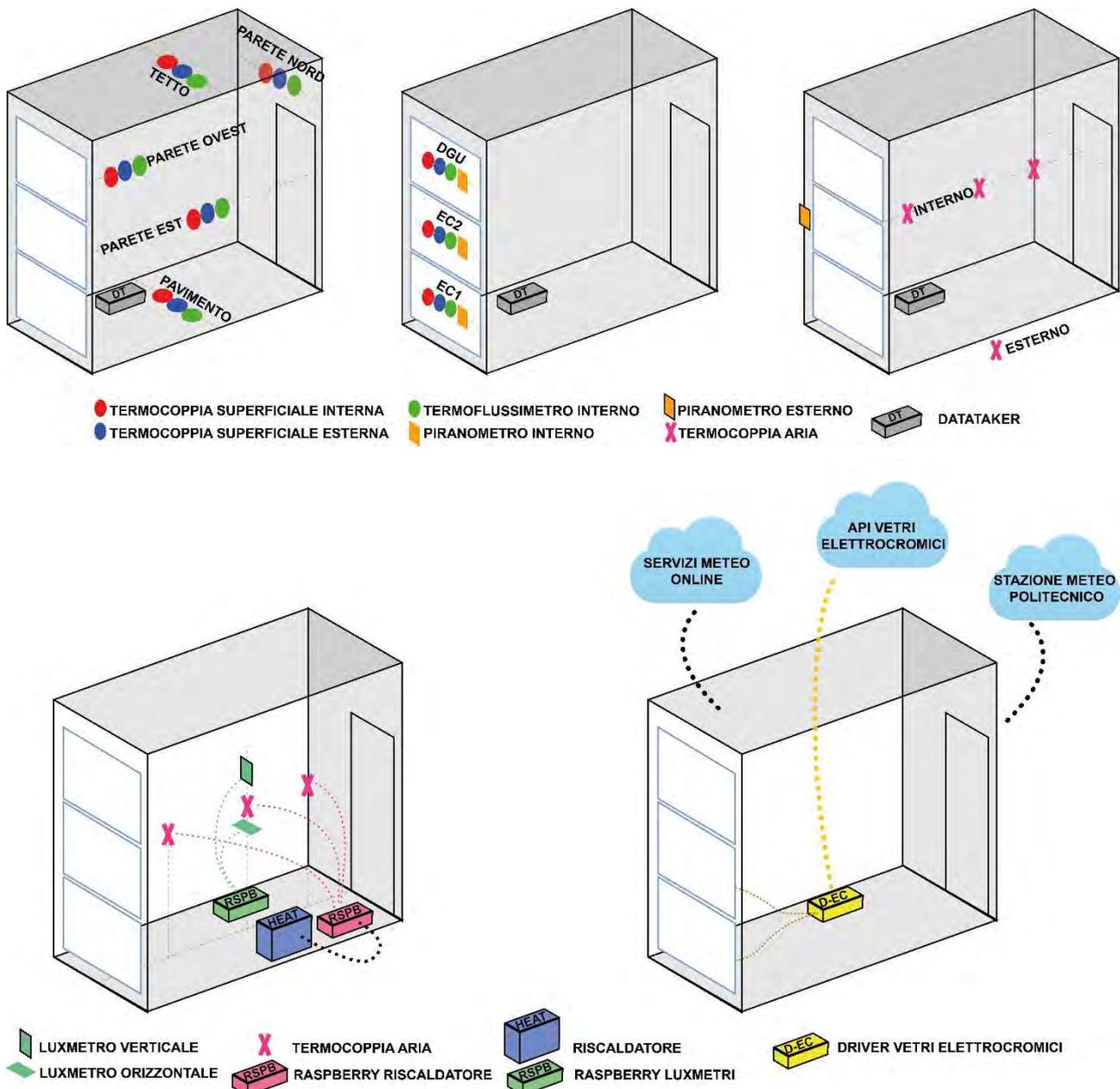


Figura 48 Infrastruttura per implementazione del controllo (generale, sia MBC che RBC).

### 6.3.1 Field layer

Il Field layer è formato dei seguenti componenti di acquisizione, come illustrato in Figura 49:

- N. 1 Datalogger DT80 (Sistema DAQ TWINS) (vedere in Figura 49 i sensori di acquisizione demandati a tale sistema);
- N. 2 Raspberry Pi4 (Sistema DAQ TWINS) (vedere in Figura 49 i sensori di acquisizione demandati a tale sistema)
- N.1 Driver vetri elettrocromici
- Acquisizione dati da API (Servizio meteo e stato elettrocromici, mostrati in Figura 49)



**Figura 49. Field layer dell'infrastruttura sperimentale TWINS con in alto illustrati i dettagli del sistema di acquisizione con datalogger DT80, ed in basso i sistemi di acquisizione basati su RPi e basati su web-service (dati climatici locali, previsioni meteo e controllo stato vetri elettrocromici).**

### 6.3.1.1 Sistema DAQ TWINS

Lo scopo di tale sistema è l'acquisizione dei dati relativi alle condizioni interne ed esterne della cella TWINS. I sensori utilizzati da tale sistema sono:

- Termocoppie di tipo T per la misura della temperatura superficiale dei componenti (opachi e trasparenti) e della temperatura dell'aria interna ed esterna;
- Termoflussimetri per la misura del flusso termico scambiato dalle superfici;
- Piranometri per la misura della radiazione solare.

Le termocoppie dell'aria interne sono posizionate a 1.5 m dal pavimento e lungo l'asse longitudinale della cella, a tre diverse distanze dalla facciata così come indicato in Figura 50. Per ogni componente opaco e trasparente, vengono posizionati un termoflussimetro sulla superficie interna rivolta verso la cella e una termocoppia di tipo T per ognuna delle superfici (interna ed esterna) del componente. Per la misura della radiazione solare trasmessa dai vetri dinamici, è presente un piranometro per ogni IGU in posizione centrale rispetto all'area vetrata per evitare fenomeni di ombreggiamento dovuti al telaio della facciata. Per caratterizzare le condizioni esterne, vengono utilizzati una termocoppia di tipo T per la misura della temperatura esterna (appositamente schermata dalla radiazione solare), un piranometro per la misura della radiazione globale orizzontale e un piranometro che misura la radiazione solare incidente sulla facciata Sud.

Data la vasta esperienza del gruppo di ricerca su attività sperimentali condotte su componenti vetrati, sono state prese delle misure precauzionali atte ad evitare misure erronee causate principalmente dalla radiazione solare diretta o riflessa che colpisce il sensore [103] [104] :

- le termocoppie dell'aria interna sono state inserite all'interno di tubi, per schermare il sensore dalla radiazione diretta e permettere il movimento libero dell'aria all'interno del tubo;
- le termocoppie superficiali esterne sono state schermate con un tubo plastico semicircolare avvolto da un nastro di alluminio;
- i termoflussimetri posizionati sui vetri sono stati schermati tramite nastro di alluminio sia sul lato interno della cella che sulla corrispondente porzione di area vetrata del lato esterno;
- i piranometri interni sono stati equipaggiati di schermi ad imbuto di colore nero opaco allo scopo di ridurre al minimo la lettura della radiazione solare riflessa dal vetro.

Tutti i sensori sono collegati ad un unico sistema di acquisizione, costituito dal DataTaker DT85. Il Datataker è collegato alla rete locale del Politecnico di Torino in modo da salvare periodicamente i dati acquisiti nella cartella condivisa in rete tramite protocollo FTP. In particolare, il sistema acquisisce i dati ogni 10 secondi, esegue le medie dei valori ogni minuto e carica i dati nella cartella di rete ogni 15 minuti.

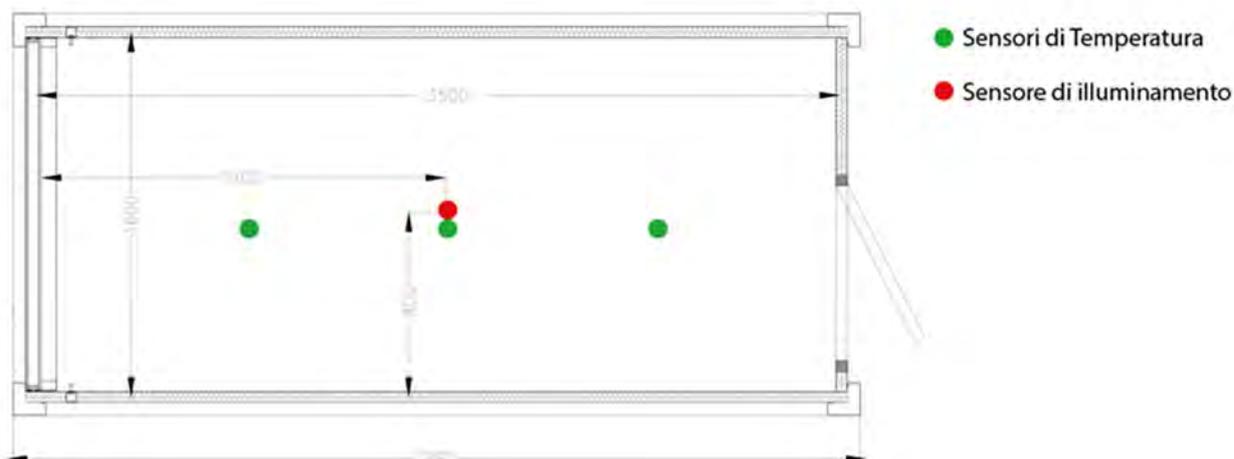


Figura 50. Pianta test cell TWINS e posizionamento sensori

Il Raspberry Pi 4 è un mini-processore basato su sistema operativo Linux, in grado di controllare attuatori attraverso appositi relè e misurare parametri ambientali tramite sensori IoT. Tali sensori utilizzano il protocollo seriale di tipo I2C (Inter-Integrated Circuit) per trasferire i dati misurati al Raspberry e sono meno accurati e meno affidabili rispetto ai sensori connessi al Datalogger; essi possono tuttavia essere facilmente integrati al Raspberry permettendo di acquisire ed elaborare dati, applicare strategie decisionali e trasmettere comandi, il tutto su un unico controllore.

Nel caso in esame, il Raspberry è stato dotato di 2 tipi di sensori: il primo misura la radiazione luminosa orizzontale sul piano di lavoro e il secondo misura la temperatura dell'aria. Nello specifico sono stati montati: i) un sensore per il monitoraggio degli illuminamenti su piano di lavoro a 0.8 m di altezza da terra e a 1.9 m dalla facciata, al centro della cella; ii) tre sensori per il controllo della temperatura posizionati a 1.5 m di altezza dal pavimento e lungo l'asse longitudinale della cella, a tre diverse distanze dalla facciata. Si veda Figura 50 per il posizionamento dei sensori.

Il Raspberry utilizza il valore della temperatura interna per controllare l'accensione e lo spegnimento di un riscaldatore elettrico tramite un relé in modo da raggiungere le temperature di set-point e set-back indeterminate per il controllo. Inoltre, esso salva i dati di fabbisogno energetico dello stesso riscaldatore. In particolare viene registrato con una frequenza di 15 secondi il dato di Potenza (Heating capacity) e salvato su un file locale. Anche il Raspberry è stato collegato alla rete locale del Politecnico di Torino e salva ogni ora i dati di Potenza e Temperatura sulla cartella condivisa in rete tramite protocollo FTP.

#### **6.3.1.2 Dati e previsioni meteo**

Al fine dell'implementazione del controllo in campo, è necessario conoscere le condizioni meteo attuali e future, definite disturbanti del sistema. Per quanto riguarda le condizioni correnti al timestep di controllo, si utilizzano i seguenti dati meteorologici rilevati dalla stazione meteo locale del Politecnico di Torino, forniti con una frequenza di 15 minuti:

- Temperatura esterna e umidità relativa;
- Pressione atmosferica;
- Direzione e velocità del vento;
- Radiazione solare globale orizzontale, normale diretta e diffusa;

Per la previsione delle disturbanti, vengono utilizzati i dati di forecast provenienti da due diversi servizi:

- Openweather [105] da cui vengono ottenuti la previsione della temperatura esterna di Torino e il fattore di cielo coperto (Sky Cover factor);
- Solcast [106] da cui si ottengono i dati delle previsioni di radiazione solare globale;

I tutti i dati meteo vengono salvati sulla cartella condivisa in rete tramite apposito script in Python.

#### **6.3.1.3 Controllo vetri elettrocromici e feedback**

Attraverso un API (Application Programming Interface) è possibile controllare lo stato di colorazione dei vetri elettrocromici: inviando il livello di colorazione desiderato – un valore intero compreso tra 0 (stato di massima trasparenza) e 100 (stato di massima colorazione) – l'API manda il comando al server dei vetri elettrocromici che lo recapita al controllore locale dei vetri. Inoltre, l'API fornisce anche il livello di colorazione assunto dai vetri in quel dato istante; tale segnale di feedback è importante nell'ottica dell'implementazione e monitoraggio dell'algoritmo di controllo in quanto permette di verificare che lo stato del vetro definito dal controllore è stato effettivamente ricevuto dal controllore locale del vetro. Tale valore viene richiesto ogni 15 minuti e salvato nella cartella condivisa in rete.

### 6.3.2 Automation layer e decision-making layer

L'automation ed il decision making layer sono integrati all'interno di un'unica workstation collegata alla rete locale del Politecnico di Torino. Le funzioni svolte da questa workstation sono le seguenti:

- Post-processing dei dati: i dati acquisiti dal filed layer vengono scaricati dalla cartella condivisa in rete tramite protocollo FTP per la loro elaborazione e analisi. In particolare, uno script in Python scarica e sincronizza automaticamente i dati del sistema DAQ, i dati di illuminamento interno, quelli relativi al fabbisogno elettrico del riscaldatore termico e i segnali di feedback dei vetri dinamici. Viene creato quindi un unico dataset che viene elaborato in automatico in modo da creare file giornalieri utili al monitoraggio del comportamento della cella di prova e dei vetri dinamici. In particolare, vengono mediate le temperature dell'aria e si valutano i coefficienti di trasmissione solare dei vetri elettrocromici al fine di avere un feedback sullo stato assunto effettivamente dai vetri elettrocromici in quel dato istante. Inoltre, viene salvato un backup del file giornalieri nella cartella condivisa in rete per le future analisi dati.
- Simulazione: a partire dai dati processati, vengono effettuate delle simulazioni preliminari all'implementazione dell'algoritmo di controllo. In particolare, viene utilizzato un modello termo-energetico semplificato per la predizione dei trend di temperatura in base alla predizione delle disturbanti e in parallelo viene usato un modello di daylight per il calcolo degli illuminamenti interni orizzontali su un punto di osservazione in funzione degli stati del vetro. I dettagli dei modelli simulativi sono presentati nella sezione 6.6 e 6.7.
- Ottimizzazione: questa attività rientra nel decision-making layer e nell'implementazione delle decisioni di controllo. Le strategie di controllo implementate sono di tipo Model-Based predittivo che applicano una minimizzazione della funzione di costo durante un orizzonte temporale prestabilito (6 ore). Questa è la fase con il più alto costo computazionale dell'infrastruttura e per ridurre i tempi dell'ottimizzazione (implementata in Matlab), è stato installato un software di ottimizzazione dell'IBM (CPLEX). I dettagli dell'implementazione dell'MPC, le funzioni di costo da ottimizzare e le relative matrici di peso, e dell'ottimizzazione, sono presentati nella sezione 6.8 e 6.9.
- Monitoraggio dati e sistema di allarmi: è stata sviluppata un'interfaccia grafica di monitoraggio in modo da facilitare la verifica del corretto funzionamento del controllo da parte dell'utente. La dashboard di Figura 51 compara lo stato ottimale del vetro deciso dal controllore con lo stato corrente dei due vetri elettrocromici e riporta l'andamento temporale della temperatura interna della TWINS, del valore del coefficiente di trasmissione solare calcolato a partire dai dati misurati dal sistema DAQ, delle disturbanti del sistema (e.g. temperatura esterna e radiazione solare incidente), dell'illuminamento orizzontale misurato sul piano di lavoro interno e della potenza elettrica erogata dal riscaldatore elettrico. Per cui tramite la dashboard è possibile facilmente riscontrare un malfunzionamento del controllo (per esempio lo stato del vetro non aggiornato). Durante i test preliminari, è stata riscontrata una frequente mancata ricezione del comando di colorazione da parte del controllore locale. Tale malfunzionamento è dovuto al controllore locale dei vetri dinamici che per brevi periodi risulta essere offline. Dato che per una corretta implementazione della strategia di controllo è cruciale che lo stato del vetro sia sempre aggiornato, si è provveduto ad automatizzare la verifica che lo stato del vetro assunto combaci con quello deciso dall'algoritmo di controllo. In caso negativo, il sistema cerca di riaggiornare lo stato del vetro: se dopo due tentativi il sistema non risulta essere online e l'aggiornamento dello stato di colorazione non può essere effettuato viene inviata una mail di *alert* in modo che si possa provvedere manualmente con un controllo dello stato dei driver dei vetri e della presenza della rete di dati nella TWINS.

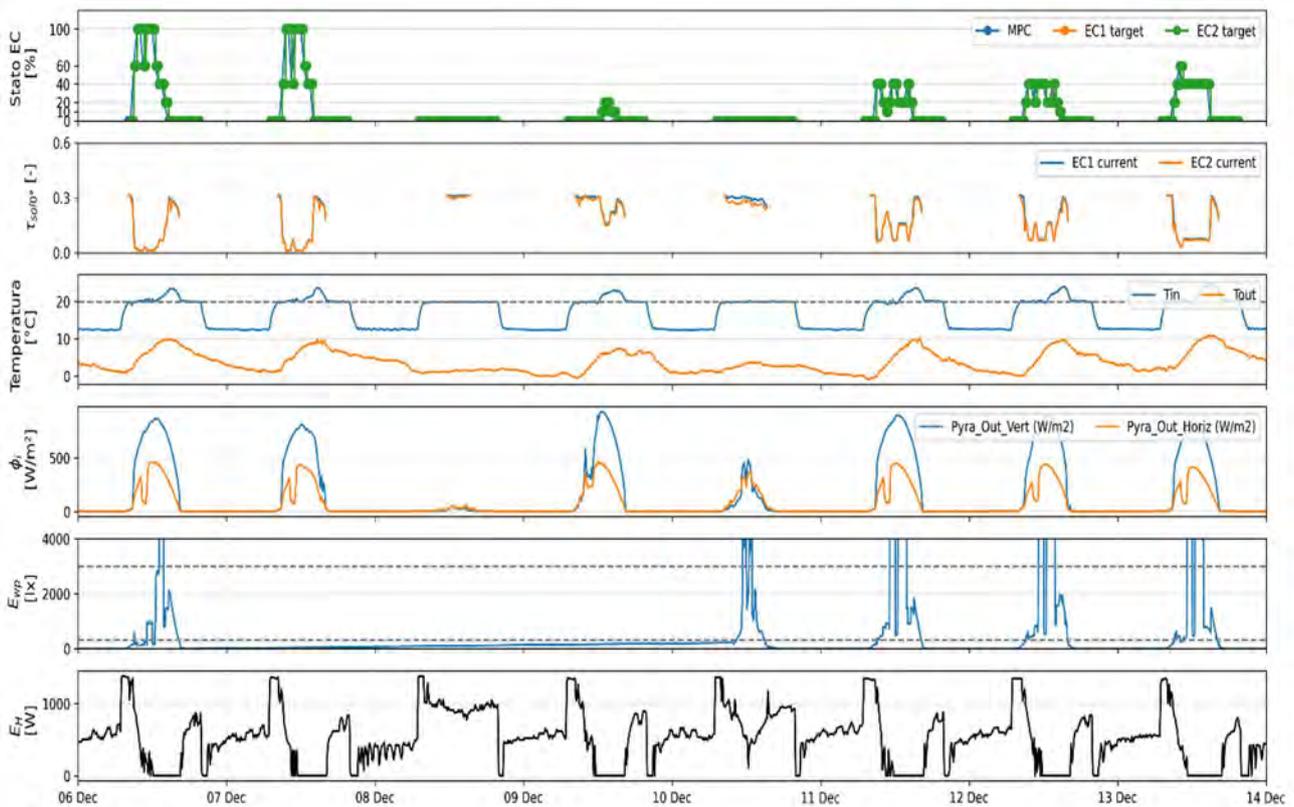
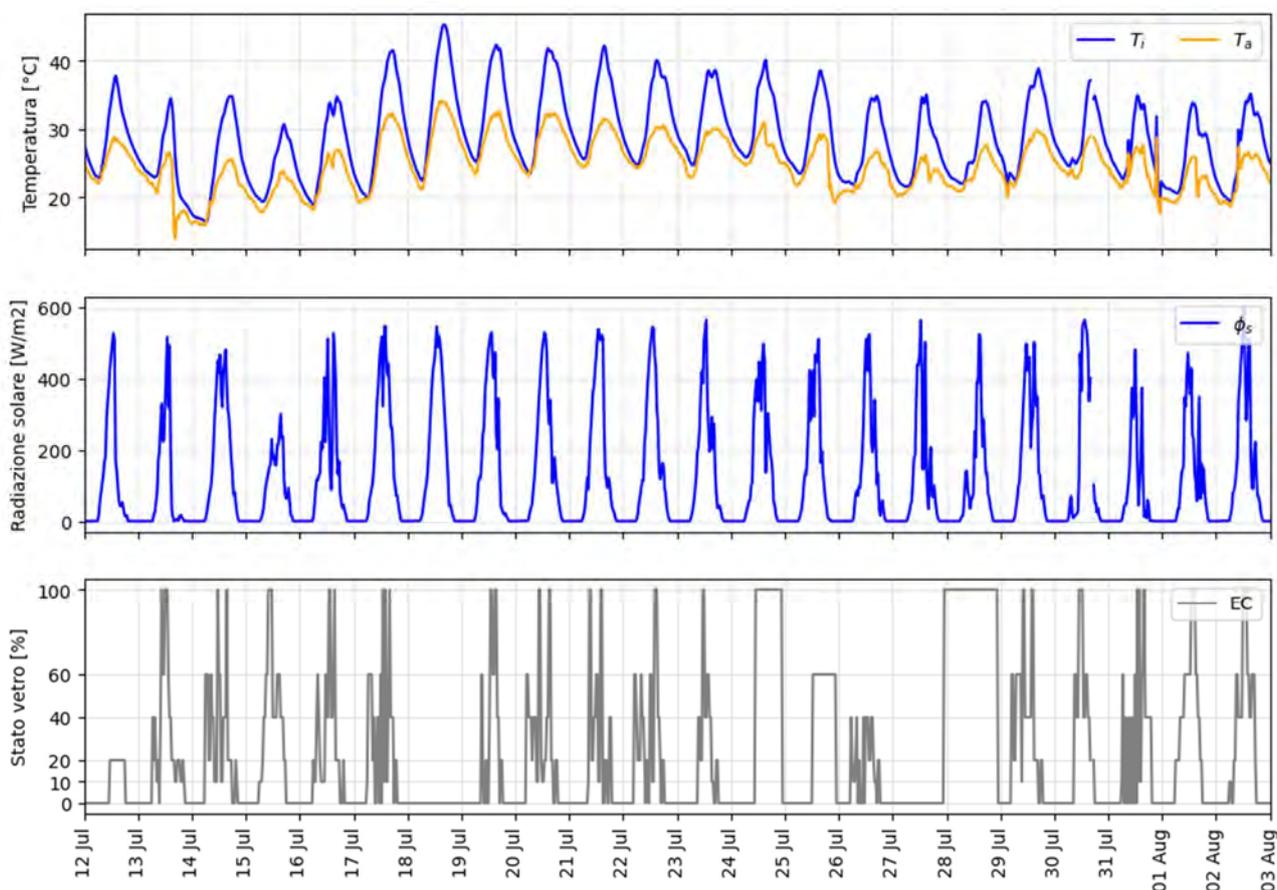


Figura 51 Dashboard di monitoraggio TWINS. Dall'alto verso il basso: Stato del vetro (target di controllo ed implementato dal driver in campo [%]); trasmissione solare misurata (con filtro sui valori di radiazione solare  $<10 \text{ W/m}^2$ , [-]); Temperatura dell'aria interna ed esterna [°C]; radiazione solare verticale a Sud incidente esterna ed interna trasmessa [W/m<sup>2</sup>]; illuminamento sul piano orizzontale interno [lux]; Potenza di riscaldamento [W] (per condizionare la cella a  $20 \pm 0.5 \text{ °C}$  di giorno e  $12 \pm 0.5 \text{ °C}$  di notte).

### 6.4 Campagna sperimentale

Dal 12 luglio al 3 agosto 2021 è stata condotta una campagna sperimentale, in cui la cella operava in free running e i vetri elettrocromici sono stati controllati tramite schedule preimpostate costruite appositamente allo scopo di indagare la dinamicità del sistema di prova. Le schedule sono state create variando lo stato del vetro e la durata dello stato in modo da alternare a cambi repentini dei componenti a periodi in cui si mantiene per più tempo uno specifico stato. Oltre all’acquisizione del dataset, tale campagna sperimentale è servita anche a testare la robustezza del sistema di controllo e monitoraggio, indispensabile per il corretto funzionamento del sistema di controllo.

In Figura 52 è riportato l’andamento della temperatura interna, la variazione dello stato di colorazione del vetro, le condizioni meteo (temperatura esterna e radiazione solare incidente sulla facciata).



**Figura 52 Dataset sperimentale campagna di luglio 2021 con in alto l’andamento delle temperature esterne ed interne, al centro l’andamento della radiazione solare verticale a Sud, in basso la schedule di funzionamento dei vetri.**

Tale dataset è stato utilizzando per due attività:

- a. Validazione del modello energetico della cella di prova (sezione 6.5);
- b. Identificazione dei parametri concentrati del modello ridotto (sezione 6.6);

### 6.5 Validazione del modello termico

Il modello energetico è un modello dinamico dettagliato costruito su EnergyPlus v 9.4 a partire dalle caratteristiche descritte nel paragrafo 6.2. La necessità di avere un modello energetico dinamico in grado di replicare con un’elevata accuratezza la dinamica dell’edificio ha reso necessaria la calibrazione e validazione dello stesso con dati sperimentali. Il modello energetico è stato calibrato durante un’attività precedente

[107] ed è stato ritenuto opportuno procedere a una ulteriore validazione in seguito all'upgrade della facciata in esame.

In primo luogo, è stata effettuata una caratterizzazione dei componenti trasparenti, verificando sperimentalmente che le proprietà ottiche dei vetri corrispondessero a quelle riportate in Tabella 28, presenti per la tecnologia indagata sul software Window. A tal fine sono stati raccolti i dati di Irradianza verticale esterna incidente ( $E_{v,e}$ ) e di Irradianza verticale interna ( $E_{v,i}$ ) registrata dai piranometri sull'apparato sperimentale. Conoscendo l'ora e di conseguenza la posizione solare è possibile identificare la correlazione tra la trasmissione solare angolare registrata ( $E_{v,i}/E_{v,e}$ ) e l'angolo solare corrispondente. Tali valori misurati sperimentalmente sono stati confrontati con i valori angolari derivati da Window per il componente modellato con i dati di caratterizzazione del materiale forniti dall'azienda produttrice. In tal modo è stato possibile verificare la corrispondenza dei dati misurati sperimentalmente con quelli forniti dall'azienda, e utilizzare la caratterizzazione in Window per l'integrazione dei componenti trasparenti nel modello di EnergyPlus. In Figura 53 è possibile osservare alcune delle correlazioni effettuate, nello specifico la correlazione tra i dati raccolti con vetro elettrocromico allo stato più chiaro (0% di colorazione; A), allo stato più scuro (100% di colorazione; B) e a uno stato intermedio (40% di colorazione; C) e i due stati presenti su Window più vicini ai dati raccolti. Considerate le incertezze di misura date dalla ridotta dimensione dei componenti e dalla presenza di ostruzioni esterne nell'apparato sperimentale viene selezionato il componente di Window con trasmissione solare superiore. In Tabella 29 si possono confrontare i valori medi di  $T_{sol}$  calcolati sperimentalmente e filtrati per angoli solari tra i 65° e i 75°, e i valori angolari e ortogonali corrispondenti estratti dal software Window.

**Tabella 29: Comparazione dei valori di Trasmissione solare media misurati (angolo solare 70°) con quelli simulati (angolo di 70° e perpendicolare)**

Stato EC	Colorazione	$T_{sol,EC1\_exp\_70^\circ}$	$T_{sol,EC2\_exp\_70^\circ}$	$T_{sol\_Window\_ang\_70^\circ}$	$T_{sol\_Window\_ort}$
[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>EC0</b>	<b>0</b>	0.16	0.19	0.21	0.384
<b>EC10</b>	<b>10</b>	0.14	0.16	0.19	0.305
<b>EC20</b>	<b>20</b>	0.09	0.12	0.13	0.226
<b>EC40</b>	<b>40</b>	0.05	0.06	0.08	0.139
<b>EC60</b>	<b>60</b>	0.02	0.03	0.04	0.096
<b>EC100</b>	<b>100</b>	0.00	0.01	0.00	0.009

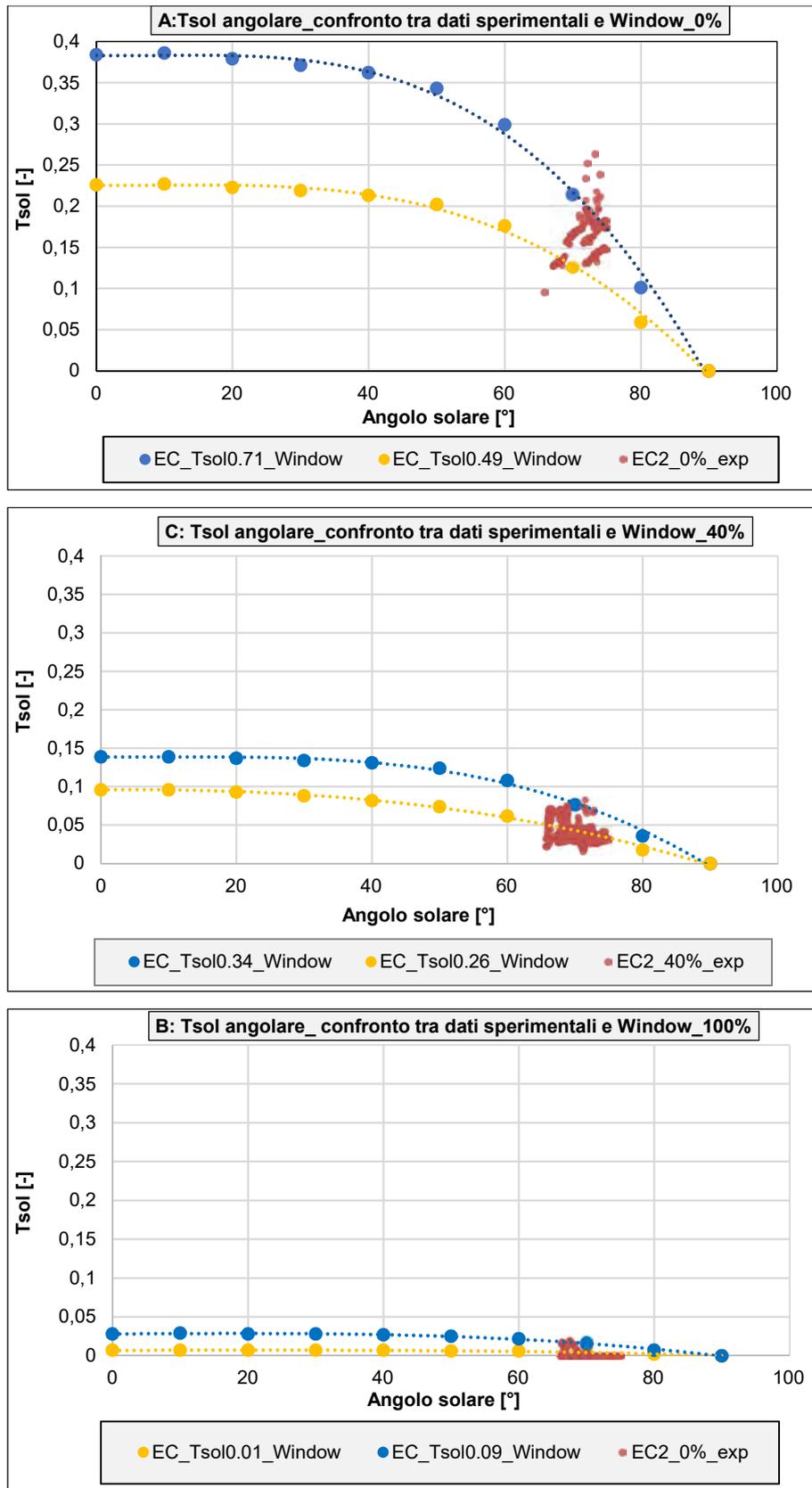
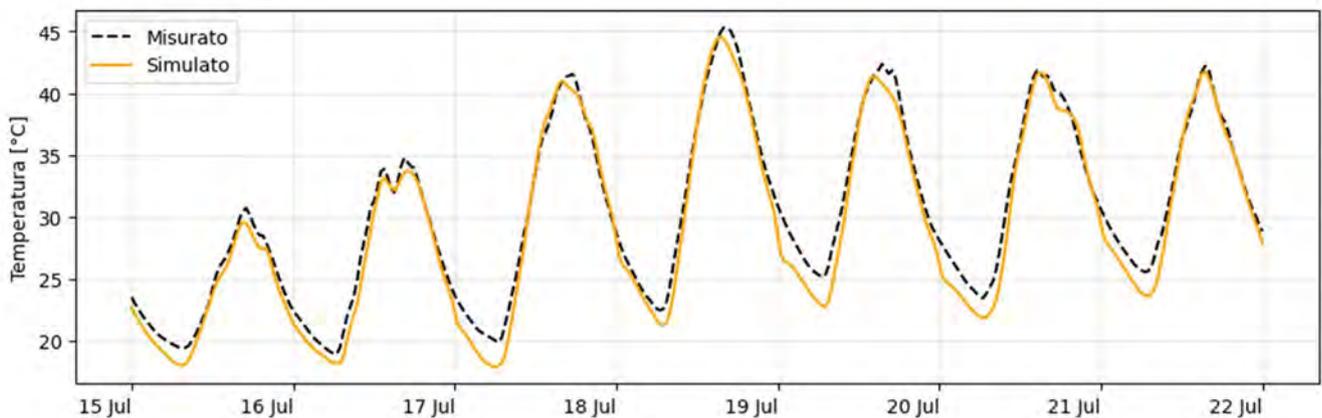


Figura 53: Verifica Trasmissione Solare vetri elettrocromici in base a stato di colorazione (EC0, EC10 in alto, EC40 al centro, e EC100 in basso).

In seguito, è stata eseguita la validazione del modello energetico considerando i dati sperimentali presentati al paragrafo 6.4. Di tale dataset è stata presa in considerazione la settimana che va dal 15 al 22 luglio durante la quale i vetri elettrocromici sono stati controllati tramite schedule variabili ai fini di testare la risposta del modello energetico a descrivere la dinamicità delle proprietà ottiche della facciata. La validazione del modello energetico è stata basata sulla temperatura media dell'aria interna perché come vedremo sarà la principale variabile di controllo degli algoritmi decisionali. Tuttavia, sono state prese in considerazione anche le temperature superficiali dei componenti opachi e trasparenti, la radiazione solare trasmessa, confrontando l'andamento simulato dal modello energetico di queste grandezze con il relativo dato misurato in campo. In Figura 54 è riportato il risultato di convalida del modello e in Tabella 30 sono riportati gli indici di calibrazione descritti in [52 53 54], abbondantemente rispettati.



**Figura 54 Confronto della temperatura interna misurata e simulata dal modello di EnergyPlus**

**Tabella 30 Indici statistici di validazione del modello di EnergyPlus**

	MBE	RMSE	CV-RMSE	P-RMSE
<b>Stima</b>	-1.47%	1.3 °C	4.30%	4.90%
<b>LIMITI</b>	± 10%	-	30%	-

## 6.6 Modello termico

I modelli semplificati di tipo grey-box sono ampiamente utilizzati per l'implementazione dei Model Predictive Control (MPC). Infatti, il buon funzionamento di un controllo MPC dipende da un modello semplice ma allo stesso tempo accurato nella stima della dinamica del sistema [108]. Tali tipi di modelli conservano la descrizione fisica del sistema da analizzare usando l'analogia di un circuito elettrico (con resistenze e capacità elettriche) per descrivere la termodinamica del sistema e i parametri concentrati vengono stimati tramite l'utilizzo di metodi di identificazione del sistema di tipo data-driven. In questa sezione viene descritta la metodologia utilizzata per l'identificazione del modello semplificato mediante l'utilizzo di un dataset ibrido simulato-misurato.

### 6.6.1 Definizione modello RC

In letteratura non esiste una procedura standard per l'identificazione del modello RC [109], ma usualmente si seguono degli accorgimenti al fine di individuare il giusto compromesso tra accuratezza del modello semplificato nel predire il comportamento fisico del sistema e tempi computazionali adeguati all'implementazione di algoritmi di controllo complessi come l'MPC. Bacher and Madsen [110] hanno proposto una serie di modelli grey in grado di rappresentare la maggior parte della modellazione degli edifici. Gli autori consigliano di partire da un modello semplice (con uno stato e un numero ridotto di parametri concentrati) per poi andare ad aumentarne la complessità del sistema (aggiungendo stati e parametri

concentrati) fino a quando non viene raggiunto un buon fit tra il valore predetto e quello di riferimento. Infatti, è da tenere conto che un'elevata complessità del modello a parametri concentrati non si traduce in un'elevata accuratezza del sistema perché l'elevato numero di parametri da stimare può minare la buona riuscita del processo di identificazione del sistema [111].

Per identificare dunque il modello ridotto della cella di prova è stata seguita la seguente metodologia: a partire dai modelli RC proposti da [110] sono stati presi in considerazione quelli a 2 stati in modo da considerare sia il nodo della temperatura dell'aria della cella (che è il parametro essenziale per la futura implementazione del controllo) che il nodo della temperatura dei componenti opachi. Gli schemi RC scelti sono riportati in Figura 55: sono tutti modelli a due stati distinti in 2R2C e 3R2C, in base al numero di parametri concentrati utilizzati per identificare il modello. Il modello più semplice è il 2R2C, costituito da 2 resistenze per descrivere lo scambio di calore del componente opaco (facendo la distinzione tra la quota parte che viene scambiata con l'ambiente interno e la restante parte scambiata con l'ambiente esterno) e da 2 capacità termiche (quella riferita all'ambiente interno e quella dei componenti opachi). Le forzanti del sistema sono invece identificate come sorgente di potenza termica (radiazione solare incidente) e di corrente (temperatura esterna). Al modello base, è stato aggiunto una seconda sorgente di potenza in modo da considerare la quota parte di radiazione solare che viene assorbita dai componenti opachi e riemessa nell'ambiente interno. Il modello risultante è stato chiamato 2R2C Ae in cui Ae indica l'area opaca del sistema. Il modello 3R2C invece è stato progettato a partire dal 2R2C, a cui è stata aggiunta una resistenza termica in parallelo per collegare il nodo di temperatura interna alla temperatura esterna. Tale parametro quindi prende in considerazione il flusso di ventilazione dovuto alle infiltrazioni del sistema. Analogamente al 2R2C Ae, in 3R2C Ae è stato aggiunto il parametro che considera l'apporto solare dei componenti opachi.

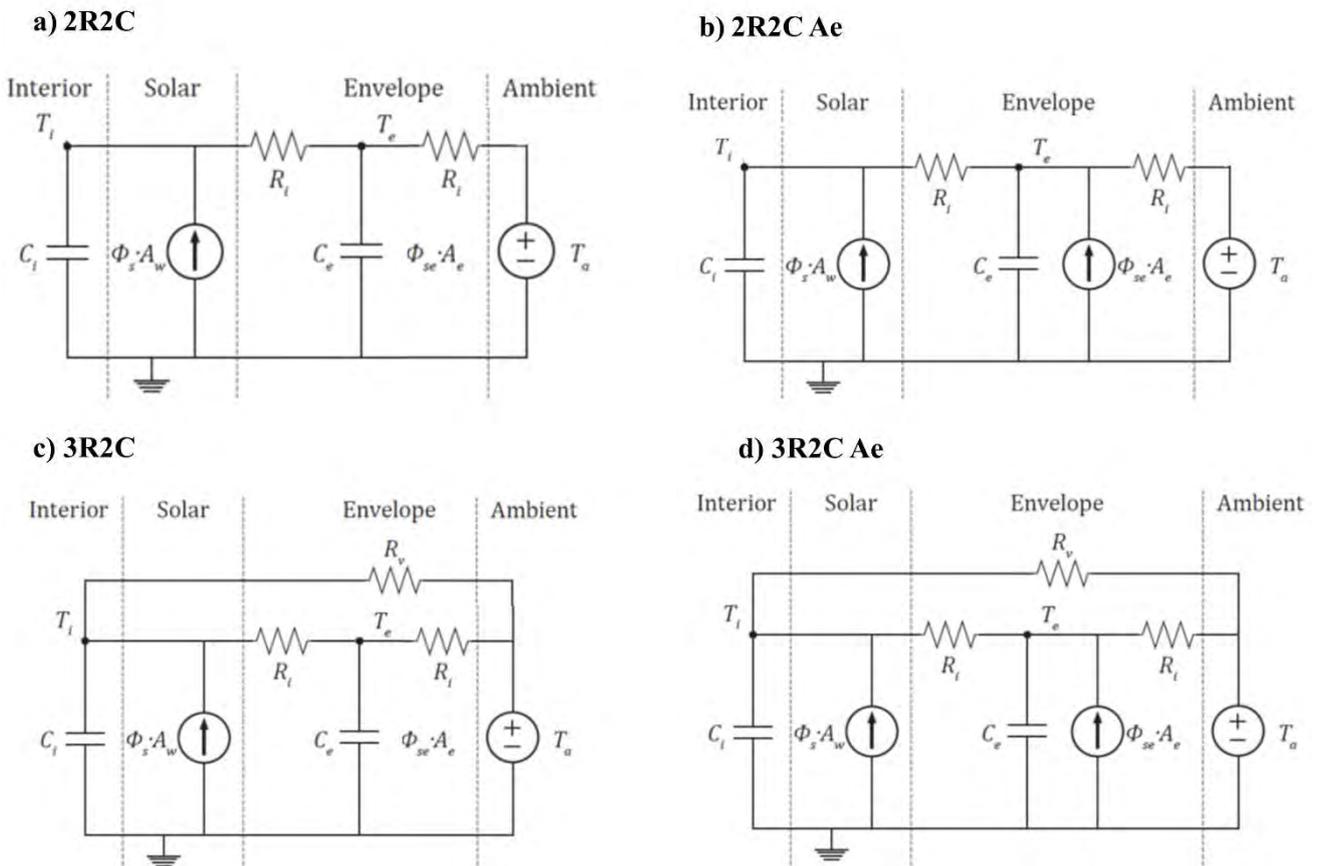


Figura 55 Schemi RC individuati per modellare il comportamento termico della TWINS

Utilizzando l'analogia elettrica e applicando le leggi di Kirchhoff ai due nodi di temperatura del modello più complesso (3R2C Ae) è possibile ricavare il seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_i C_i} (T_e - T_i) + \frac{1}{R_v C_i} (T_a - T_i) + \frac{1}{C_i} \phi_s A_w \quad (6.1)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{1}{R_i C_e} (T_i - T_e) + \frac{1}{R_i C_e} (T_a - T_e) + \frac{1}{C_e} \phi_{se} A_e \quad (6.2)$$

Si noti che la formulazione delle equazioni del modello 3R2C Ae è una generalizzazione della formulazione di tutti i modelli presi in esame.

Le variabili di stato del sistema sono:

- $T_i$  temperatura interna dell'aria [°C];
- $T_e$  temperatura interna dei componenti opachi equivalenti [°C];

$T_e$  è una temperatura fittizia, introdotta per tenere in considerazione nel modello semplificato dell'inerzia termica dei componenti opachi.

Gli input del sistema sono:

- $T_a$  temperatura dell'aria esterna [°C];
- $\phi_s$  apporto solare tramite i componenti vetriati [kW/m<sup>2</sup>];
- $\phi_{se}$  apporto solare tramite componenti opachi [kW/m<sup>2</sup>];

In particolare,  $\phi_s$  indica la radiazione solare entrante nell'ambiente interno attraverso i componenti vetriati ed è l'unico parametro controllabile, perché funzione dello stato dei vetri elettrocromici. Tale apporto può essere tenuto conto in diversi modi ed è stato ritenuto più opportuno considerare la radiazione solare incidente sulla facciata Sud  $\phi_i$  moltiplicata per il valore di g-value di tutto il sistema vetrato:

$$\phi_s = \phi_i \cdot g^* \quad (6.3)$$

in cui  $g^*$  è la media ponderata dei singoli valori del coefficiente solare sulla rispettiva area vetrata:

$$g^* = \frac{\sum_i g_i A_{w,i}}{A_{w,tot}} \quad (6.4)$$

Per valutare l'apporto solare tramite i componenti opachi, sono state formulate due diverse ipotesi: una considera la radiazione solare globale orizzontale (tale caso è stato dunque nominato Ae  $\phi_g$ ); la seconda utilizza la radiazione solare incidente sulla facciata Sud (tale caso è stato dunque nominato Ae  $\phi_i$ ). L'identificazione di tale parametro non è così banale nel caso specifico di questa cella sperimentale, vista la presenza di diverse superfici opache su orientamenti e con inclinazioni diverse (tetto, parete Est, Ovest e Nord), e quindi dipendente dalla posizione del Sole e dalle proprietà termiche dei componenti opachi; il valore Ae infatti dovrebbe essere variabile in funzione dell'area di superficie opaca irraggiata in quell'istante dal Sole. Dato la natura e la semplicità dei modelli ridotti in genere utilizzati (per necessità computazionali), e di quello progettato ed identificato per il caso studio specifico (che considera tutto l'involucro opaco concentrato in un'unica superficie, e quindi in un unico parametro), si è reso necessario questo confronto tra le due ipotesi di cui sopra. Inoltre, il caso Ae  $\phi_i$  comporta l'utilizzo di una sola variabile per la descrizione dei guadagni solari attraverso i componenti trasparenti e opachi, e quindi sarebbe più congeniale per ridurre il numero di input del sistema matriciale. Il sistema di equazioni (6.1 e 6.2) può essere riscritto in forma matriciale in modo da distinguere le variabili di stato e i valori di input:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_i}{dt} \\ \frac{dT_e}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_i C_i} + \frac{1}{R_v C_i}\right) & \frac{1}{R_i C_i} \\ \frac{1}{R_i C_e} & -\left(\frac{2}{R_i C_e}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_i \\ T_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_v C_i} & \frac{A_w}{C_i} & 0 \\ \frac{1}{R_i C_e} & 0 & \frac{A_e}{C_e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_s \\ \phi_{se} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Infine, i parametri da identificare del sistema sono:

- $R_i$  resistenza termica equivalente dell'involucro opaco [K/kW];
- $R_v$  resistenza termica equivalente delle infiltrazioni [K/kW];
- $C_i$  capacità termica equivalente dell'ambiente interno [kWh/K];
- $C_e$  capacità termica equivalente dell'involucro opaco [kWh/K];
- $A_w$  area vetrata effettiva [m<sup>2</sup>];
- $A_e$  area della superficie opaca illuminata dal sole [m<sup>2</sup>].

Sebbene tali parametri abbiano un significato fisico, non possono essere direttamente calcolati conoscendo le caratteristiche dei componenti edilizi, ma necessitano di essere stimati attraverso un processo di identificazione matematica (data-driven). Infatti, i modelli di tipo grey-box hanno una natura ibrida tra la modellazione di tipo white-box e quella black-box nel senso che ereditano dalla prima l'utilizzo di leggi matematiche per descrivere il comportamento fisico del sistema (approccio white-box, o modelli fisici) e utilizzano l'approccio data-driven per l'identificazione dei parametri concentrati del sistema stesso (approccio black-box, o modelli data-driven). In particolare, l'identificazione dei parametri è stata svolta per ogni modello RC presentato in questa sezione allo scopo di valutare il modello migliore in grado di descrivere il comportamento termico del sistema in esame in termini di temperatura interna dell'aria.

Per ognuno dei modelli presentati, viene svolta l'identificazione dei parametri tramite un dataset di training e si utilizza un dataset di test per ricavare l'indice NRMSE che identifica il livello di accuratezza del modello identificato. In particolare, l'indice NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) è definito come di seguito:

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_p - x_m)^2} \quad (6.6)$$

in cui  $x_p$  e  $x_m$  sono i valori rispettivamente predetto e osservato al dato istante,  $N$  è il numero di osservazioni e  $\bar{y}$  è il valore medio dei valori osservati.

Tale indice viene calcolato considerando 3 dataset diversi:  $NRMSE_{TR}$  è calcolato sul dataset di training e dunque da una valutazione su quanto il modello è in grado di predire bene la temperatura interna sul dataset su cui è stato allenato,  $NRMSE_{TE}$  invece indica l'accuratezza del modello rispetto al dataset di test con dati al minuto e infine  $NRMSE_{TE30}$  è riferito al dataset di test discretizzato in valori ogni 30 minuti. Infatti, il modello viene identificato su un dataset al minuto per descrivere dettagliatamente tutte le dinamiche del sistema e in seguito viene discretizzato in base al timestep della strategia di controllo che si vuole implementare, nel caso in esame 30 minuti.

### 6.6.2 Identificazione RC con dataset sperimentale

Il processo di stima dei parametri concentrati del modello ridotto richiede un'ingente quantità di dati di input e output (variabili di stato) in modo che il modello possa essere adeguatamente addestrato per trovare le correlazioni tra i due insiemi. Generalmente, si addestra il modello su un dataset detto di training attraverso cui vengono stimati i parametri del sistema e poi si testa l'accuratezza del sistema tramite il dataset di test; in questo modo viene valutata la capacità di predizione del modello tramite un set di dati diversi da quello su cui è stato svolto l'addestramento del sistema.

A tal fine è stato utilizzato il dataset introdotto al paragrafo 6.4 implementato per 3 settimane estive (dal 12 luglio 2021 al 3 agosto 2021). Come già anticipato, durante tale campagna la cella operava in free-running e i vetri elettrocromici sono stati controllati tramite schedule preimpostate caratterizzate da periodi in cui è stato variato molto frequentemente lo stato del vetro alternati a periodi con cambiamenti meno frequenti. Questo serve ad aumentare la robustezza del modello perché viene allenato su un dataset che descrive la casistica più frequente dei fenomeni fisici del sistema. Le prime due settimane del dataset sono state utilizzate per l'addestramento del modello, mentre l'ultima settimana è stata utilizzata per testarne l'accuratezza.

Per la stima dei parametri è stato utilizzato il tool di Matlab Linear Grey-Box Models [112]. Per ogni parametro da identificare è richiesto il valore iniziale del parametro e il range del dominio di appartenenza. Per l'individuazione del valore iniziale si utilizzano considerazioni della fisica tecnica: alcuni parametri sono di facile identificazione perché corrispondono a parametri caratterizzanti l'elemento, come ad esempio le superfici delle aree vetrate o la capacità termica dell'ambiente interno, per altre invece occorre più astrazione. Ad esempio, la stima della resistenza termica equivalente dell'involucro opaco è basata sull'analogia elettrica considerando dunque i componenti opachi come dei resistori termici collegati tra loro in parallelo e ricavando la resistenza equivalente del sistema.

In Tabella 31 sono mostrati i valori dei parametri concentrati stimati dal tool di Matlab per ognuno dei modelli introdotti nella precedente sezione, insieme all'indicatore di fitness calcolato rispetto ai 3 dataset.

Analizzando i risultati, è evidente che i modelli 2R2C e 3R2C non siano in grado di descrivere al meglio la dinamica del sistema e dunque l'apporto solare dei componenti opachi non può essere trascurato. Analizzando il trend della temperatura risultava evidente che durante le ore centrali del giorno si verificavano deviazioni di 5°C tra il valore misurato e quello stimato dai due modelli. Tutti gli altri modelli analizzati hanno ottime prestazioni predittive e si è scelto di utilizzare il modello 3R2C Ae  $\phi_i$  perché seppur di poco presentava indici prestazionali superiori al corrispettivo 3R2C Ae  $\phi_g$ ; inoltre è il modello che richiede l'utilizzo della stessa variabile per identificare l'apporto solare tramite i componenti vetrate andando dunque a ridurre il numero di input richiesti dal sistema. Di seguito, quindi si farà riferimento solo a tale modello, che per semplicità viene nominato "modello ridotto" o "modello RC".

**Tabella 31 Risultati dell'identificazione dei parametri concentrati dei modelli ridotti**

Modello ridotto	Ri [K/kW]	Ci [kWh/K]	Ce [kWh/K]	Aw [m <sup>2</sup> ]	Rv [K/kW]	Ae [m <sup>2</sup> ]	NRMSE <sub>TR</sub>	NRMSE <sub>TE</sub>	NRMSE <sub>TE30</sub>
2R2C	25.81	0.0243	0.0945	2.25	-	-	78%	65%	62%
2R2C Ae $\phi_g$	4.33	0.0046	0.5894	1.55	-	2.85	<b>88%</b>	<b>80%</b>	<b>77%</b>
2R2C Ae $\phi_i$	9.33	0.0046	0.2832	1.21	-	2.79	<b>87%</b>	<b>80%</b>	<b>76%</b>
3R2C	14.26	0.0290	0.2066	5.42	73.89	-	72%	59%	58%
3R2C Ae $\phi_g$	5.63	0.0050	0.5999	1.72	20.37	3.44	<b>87%</b>	<b>80%</b>	<b>78%</b>
3R2C Ae $\phi_i$	14.23	0.0433	0.3767	2.73	11.45	6.45	<b>89%</b>	<b>82%</b>	<b>80%</b>

### 6.6.3 Identification RC con dataset sperimentale surrogato

Avendo un dataset sperimentale e un modello energetico della cella in esame, è sorta l'esigenza di verificare quanto un modello identificato tramite dati sperimentali si discosti da quello identificato tramite un dataset generato tramite simulazioni. Infatti, i lavori presenti in letteratura utilizzano generalmente dataset di tipo simulativo per identificare i parametri concentrati del sistema. Le misure in campo sono spesso costose e richiedono molto tempo: infatti per ottenere un dataset valido sono necessarie almeno 3 settimane di dati per ogni stagione (2 settimane per il training ed 1 per test), sensoristica costosa e personale con esperienza di misura in campo. Per verificare tale assunzione dunque è stato generato un dataset sperimentale surrogato, risultante da simulazioni del modello di Energyplus che utilizzano le forzanti (condizioni climatiche e stati dei vetri) del dataset sperimentale (12 luglio – 3 agosto).

La Tabella 32 riporta i valori dei parametri concentrati del modello ridotto identificati attraverso il dataset sperimentale e il dataset simulativo, nonché la fitness del modello RC costruito con questi dati, rispetto alla sua capacità di predire la temperatura interna misurata in campo (e non simulata) della cella nel periodo di test (ultima settimana). I risultati evidenziano dunque che i due modelli identificati sono comparabili tra di loro, sia in termini dei valori assunti dai parametri concentrati che dai valori di fitness del modello. Questo è un risultato molto importante per l'applicazione dei modelli ridotti e la loro generalizzazione, in quanto ci conferma che è possibile utilizzare un dataset simulativo, generato utilizzando un modello energetico validato e calibrato su dati sperimentali, per identificare i parametri di una RC che sia utilizzabile per predire la temperatura interna di un ambiente reale, evitando la necessità di generare tale dataset da dati sperimentali (soprattutto nella necessità di dover utilizzare RC diverse per stagione di raffrescamento e riscaldamento, riducendo di molto i tempi ed i costi di misura / sperimentazione).

**Tabella 32 Confronto dei parametri del modello ridotto dataset sperimentale/surrogato**

Dataset	Ri [K/kW]	Ci [kWh/K]	Ce [kWh/K]	Aw [m <sup>2</sup> ]	Rv [K/kW]	Ae [m <sup>2</sup> ]	NRMSE <sub>TR</sub>	NRMSE <sub>TE</sub>	NRMSE <sub>TE30</sub>
Sperimentale	14.23	0.043	0.377	2.73	11.45	6.45	89%	82%	80%
Surrogato	13.50	0.030	0.293	3.14	11.95	6.05	83%	82%	79%

### 6.6.4 Identificazione RC con dataset ibrido

Lo scopo dell'identificazione della RC è l'implementazione in campo del MPC. Dal momento che l'identificazione del sistema ridotto è stata fatta a partire da un dataset estivo e considerato che l'implementazione in campo del controllo MPC è stata programmata per il periodo autunnale, è nata l'esigenza di testare la prestazione del modello ridotto "estivo" su dati autunnali. Testando il modello ridotto su un dataset sperimentale di tipo autunnale, si è trovato un valore del NRMSE<sub>TE30</sub> pari al 71% con una sottostima di 5°C sulle temperature di picco stimate dal modello RC rispetto a quelle reali misurate in campo.

Per questi motivi e viste le considerazioni fatte nella sezione 6.6.3, è stato dunque deciso di identificare i parametri dello stesso modello ridotto utilizzando un dataset ibrido (surrogato + sperimentale) autunnale, così composto: per il dataset di stima dei parametri (training) è stato utilizzato un dataset surrogato come descritto nella sezione 6.6.3 di 2 settimane, mentre per il dataset di test è stato utilizzato un dataset sperimentale di una settimana (fine settembre) con una schedule di variazione dello stato dei vetri EC. In questo modo l'identificazione dell'RC viene fatta su dati simulati (training), mentre la verifica dell'accuratezza del modello viene fatta su dati sperimentali. Si ricorda però che questa non è una scelta obbligata (si potrebbe utilizzare un dataset completamente surrogato sia per training che per test) ma è stata utilizzata vista la disponibilità dei dati sperimentali, al fine di avere una stima più precisa dell'accuratezza di tale modello.

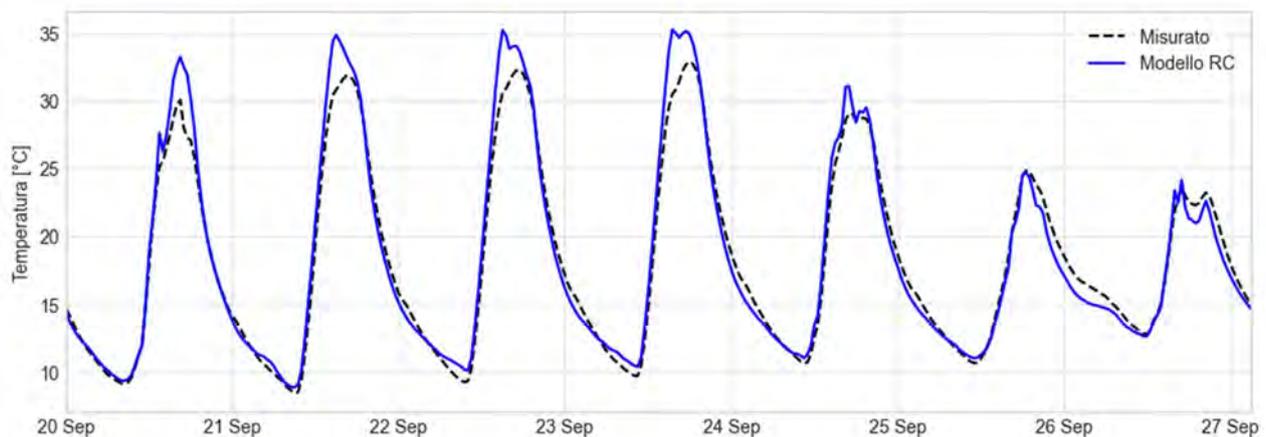
In Tabella 33 sono indicati i valori dei parametri identificati tramite il dataset autunnale e in Figura 56 è mostrato il confronto tra la temperatura interna misurata in campo (linea nera tratteggiata) e quella predetta

dal modello ridotto (in blu). Con l'identificazione del nuovo modello è stata nuovamente garantita l'accuratezza della predizione nel dataset autunnale.

La necessità di aggiornare il modello in base alle condizioni meteo era stata già evidenziata in letteratura [109] [111] e dal momento che la performance del controllo dipende dall'accuratezza di previsione del modello ridotto, si consiglia di controllare periodicamente l'accuratezza del modello utilizzato nel dataset (ad esempio stagionalmente) per verificare la necessità di una ricalibrazione dei parametri in base al valore di  $NRMSE_{TE}$  e  $NRMSE_{TE30}$  (riferito all'intervallo di controllo specifico), che deve essere superiore del 75%.

**Tabella 33 Confronto dei parametri del modello ridotto estivo/autunnale**

Dataset	Ri [K/kW]	Ci [kWh/K]	Ce [kWh/K]	Aw [m <sup>2</sup> ]	Rv [K/kW]	Ae [m <sup>2</sup> ]	NRMSE <sub>TR</sub>	NRMSE <sub>TE</sub>	NRMSE <sub>TE30</sub>
Estivo – sperimentale	14.23	0.043	0.377	2.73	11.45	6.45	89%	82%	80%
Autunnale - ibrido	5.06	0.070	0.456	6.00	13.56	6.60	90%	84%	81%



**Figura 56. Confronto tra temperature interne del modello ibrido (in autunno) e dati sperimentali.**

## 6.7 Modello di daylight

Il modello semplificato RC per la simulazione termica della cella deve essere integrato con un modello che permetta di predire il comportamento della test-cell dal punto di vista della luce naturale. Si è identificato come metodo semplificato per il calcolo degli illuminamenti il metodo dello SplitFlux, derivato dal modello di calcolo della luce naturale sviluppato in DOE-2.1E [113] [114]. Tale modello si basa sul calcolo dei "daylight factors" relativi a 4 diversi tipi di cielo (sereno, sereno con foschia, intermedio e coperto) calcolati utilizzando i seguenti parametri:

- Azimuth, Zenith e dati geometrici solari;
- Distribuzione della luminanza celeste;
- Illuminamenti esterni;
- Fattori di riflessione delle superfici interne ed esterne;
- Fattori di luminanza tra volta celeste e superfici trasparenti;
- Trasmissione visibile delle superfici trasparenti;

Per ogni tipo di cielo vengono calcolati i daylight factors con la seguente procedura: i) vengono calcolati gli illuminamenti orizzontali esterni dovuti a radiazione solare e radiazione diffusa celeste da standard [115]; ii) vengono calcolati gli illuminamenti interni, le luminanze delle finestre e la luminanza di fondo delle finestre per ogni punto considerato, in presenza e assenza di schermatura se specificato con condizioni di cielo standard; iii) vengono calcolati i daylight factors dividendo i dati descritti in ii) per l'illuminamento esterno.

Per calcolare gli illuminamenti interni in un determinato momento e a certe condizioni esterne viene innanzitutto determinato il valore di illuminamento esterno da radiazione solare e diffusa dalla volta celeste da file climatico. Successivamente vengono interpolati i daylight factors in base alla posizione solare e moltiplicati per l'illuminamento orizzontale esterno dovuto alla volta celeste (per tutti i tipi di cielo adeguati al caso) per trovare l'illuminamento interno dipendente dalla volta celeste, e per l'illuminamento orizzontale esterno dovuto alla radiazione solare per trovare l'illuminamento interno dipendente dal sole. La somma dei due illuminamenti restituisce il valore finale.

Il modello di calcolo degli illuminamenti descritto nel paragrafo precedente è stato implementato in campo e nelle simulazioni tramite l'utilizzo diretto di EnergyPlus. Per fare questo è stato costruito un modello semplificato della cella a partire da quello usato nella validazione, con le caratteristiche geometriche, dei componenti trasparenti e dei materiali descritte nella sezione 6.2. Il modello è stato semplificato solo con l'obiettivo di effettuare più velocemente i calcoli della parte di daylighting. È stato inserito un punto di misura dell'illuminamento orizzontale interno a 1.9 m dalla facciata e a 0.8 m dal pavimento. È stata scelta questa posizione perché concorde con quella di un sensore di illuminamento effettivamente presente in campo (vedere Figura 50). Il modello di EnergyPlus è dunque in grado di calcolare gli illuminamenti nel punto identificato per le diverse configurazioni vetrate e sulla base a un file climatico epw di input. Se il file climatico viene modificato con i dati reali misurati è possibile dunque effettuare una simulazione che restituisca il calcolo degli illuminamenti interni tramite il metodo dello SplitFlux per le condizioni effettivamente registrate in campo. Il file climatico può essere modificato anche con dati di forecast, rendendo possibile la predizione della condizione di luce naturale dei timestep successivi all'interno della cella.

In base al controllo che si vuole implementare nel modello e in particolare se esso sia un controllo reattivo, ovvero basato sulle condizioni climatiche e sui parametri di decisioni misurati nell'istante corrente, o predittivo, e dunque basato su condizioni climatiche e parametri di forecast, vengono utilizzati due file climatici diversi, i cui dati vengono sostituiti con quelli provenienti da fonti diverse. Il file climatico definito "corrente", utilizzato per tutte le simulazioni con controlli di tipo reattivo, viene modificato con i dati misurati in loco nel timestep esaminato dalla Stazione Meteo del Politecnico di Torino e con il valore di Sky Cover ottenuto da Openweather. Il file climatico definito "forecast", in cui vengono modificati i dati dei timestep successivi a quello corrente, viene aggiornato con i dati di forecast forniti dei due diversi servizi online Openweather e Solcast. Si veda in Figura 57 lo schema dell'integrazione dei calcoli di illuminamento all'interno del modello simulativo MPC sviluppato, con evidenziati in arancione i servizi meteo online che forniscono i dati, in blu il modello deputato al calcolo degli illuminamenti e in verde il passaggio al modello MPC.

Nel file climatico corrente i dati della Stazione Meteo Polito sostituiscono i valori standard di: irradianza globale orizzontale; Irradianza diffusa; Irradianza diretta normale; Temperatura esterna; Direzione e velocità del vento; Pressione Atmosferica; Umidità Relativa; Percentuale di nuvolosità del cielo (quest'ultimo data è preso da un servizio di forecasting [105]). Nel file climatico di previsione (contenente i valori per le prossimi 12 time step di controllo) vengono inseriti i seguenti valori: Irradianza globale orizzontale, Irradianza diffusa e Irradianza diretta normale (da Solcast [106]); Sky Cover e Temperatura esterna (da Openweather [105]). La compilazione dei due file climatici può essere fatta contemporaneamente alla simulazione e al controllo in campo, come dettagliato nel paragrafo 6.9.

Tale modello, per il metodo di calcolo su cui è basato (Radiosity) è intrinsecamente meno accurato di un modello basato sul metodo di calcolo di backward Ray-tracing [116]. Tuttavia, per ambienti semplici dal punto di vista della geometria, non sussistono differenze elevate tra i risultati ottenuti con i suddetti metodi [117]. Pertanto, dato anche il tipo di hardware a disposizione, si è ritenuto opportuno per questa

implementazione utilizzare un metodo di calcolo che permettesse di stimare gli illuminamenti interni con un tempo di calcolo compatibile con il time step di controllo.

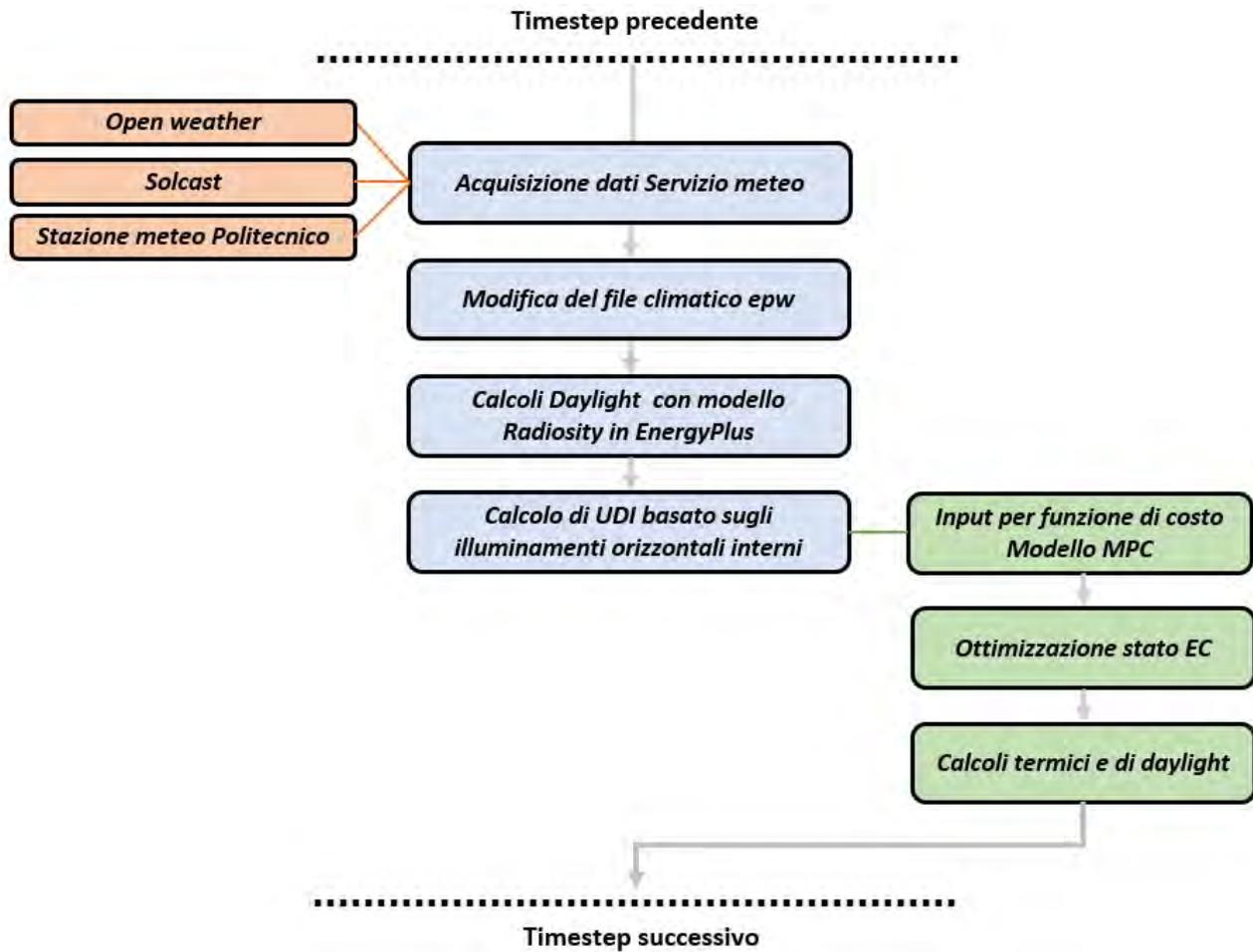


Figura 57: Funzionamento del modello Radiosity e sua integrazione nella simulazione MPC

### 6.8 Formulazione ed implementazione del Model Predictive Control

Il Controllo Model Predictive (MPC) è un controllo di tipo Model Based che utilizza un modello semplificato del sistema da controllare per scegliere la strategia migliore in modo da raggiungere degli obiettivi prestabiliti. MPC è in grado di sfruttare sia le previsioni delle disturbanti (e.g. condizioni meteo, apporti interni) che determinati requisiti (come il comfort interno) per ottimizzare il comportamento termico del sistema sulla base di determinati obiettivi di controllo. Grazie alle proprietà predittive, il controllo MPC manipola parametricamente le variabili di input (come ad esempio l'apporto solare attraverso i componenti trasparenti o il fabbisogno energetico da fornire tramite l'impianto HVAC) e sceglie la sequenza di stati futuri che ottimizzano una determinata funzione di costo durante l'orizzonte temporale di ottimizzazione (detto *control horizon*). Inoltre, per ridurre la propagazione degli errori, ad ogni time-step il controllore applica il primo valore della sequenza degli stati, scarta tutti i valori successivi e sposta in avanti il control horizon [108]. Tale procedura, peculiare dell'MPC, è detta *receding horizon*, schematizzata in Figura 58.

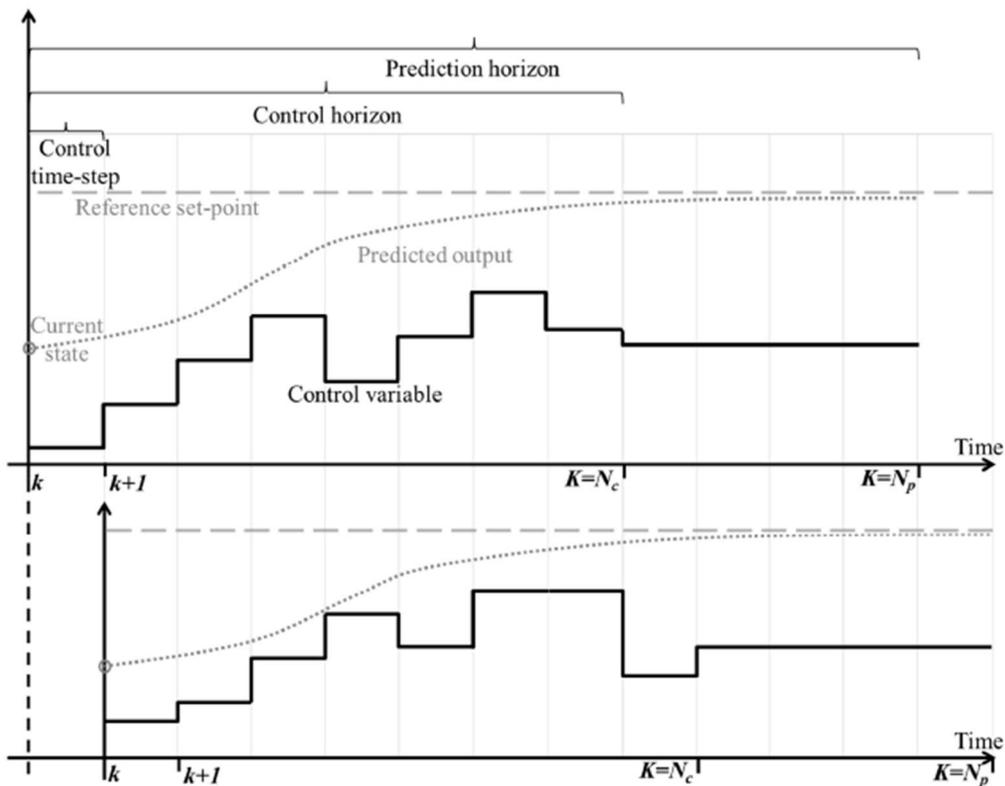


Figura 58 Schema del principio del receding horizon [108]

Nel caso in esame, la formulazione dell'MPC ha lo scopo di controllare lo stato dei vetri elettrocromici per modulare l'apporto di radiazione solare tramite la facciata dinamica nella cella di prova in modo da garantire i requisiti di comfort termico e visivo degli occupanti. Nella formulazione bisogna dunque considerare sia variabili continue (e.g. temperatura interna, temperatura esterna e radiazione solare incidente la facciata) che variabili discrete (e.g. gli stati dei vetri elettrocromici descritti in Tabella 28). Per tale motivo, è stato utilizzato un controllo ibrido Model Predictive (HMPC) per implementare l'algoritmo di ottimizzazione del controllo in esame [111]. In particolare, la formulazione è stata scritta utilizzando il linguaggio HYSDEL [118] e l'algoritmo decisionale è stato sviluppato tramite il Multi-Parametric Toolbox 3.0 (MPT3) [119] di Matlab.

Per l'applicazione del MPC nel caso studio in esame, è stato scelto un orizzonte di controllo di 6 ore e un timestep di controllo di 30 minuti. Le ragioni di questa scelta sono strettamente correlate alla dinamica del sistema e allo sforzo computazionale: i parametri scelti corrispondono infatti al giusto compromesso dei due fattori in quanto è in linea con la dinamica del sistema e considera un orizzonte temporale sufficientemente lungo da tenere conto delle variazioni delle disturbanti esterne [111].

Due sono i fattori indispensabili per l'identificazione di un controllo MPC: un accurato modello semplificato del sistema da controllare e la formulazione della funzione di costo da ottimizzare durante il control horizon. Per quanto riguarda il modello semplificato, è stato utilizzato il modello ampiamente descritto al paragrafo 6.6 e 6.7; di seguito viene descritta la metodologia che ha portato alla formulazione della funzione di costo del MPC.

### 6.8.1 Funzione di costo generale e constraints (soft and hard)

I constraints del sistema sono dei vincoli sul dominio delle variabili (sia input che stati del sistema) durante l'evoluzione temporale del sistema. La logica alla base di tali vincoli è che alcune quantità non possono andare al di sotto o al di sopra di una determinata soglia, a causa per esempio della natura fisica della variabile o per requisiti prestazionale (e.g. il range di comfort della temperatura interna). In particolare, i vincoli possono essere definiti hard o soft constraint: i primi non possono essere violati, mentre i soft constraint permettono la possibilità di violare i vincoli, penalizzando però tale alternativa tramite un opportuno peso nella funzione costo.

Nel caso in esame, vengono definiti i seguenti vincoli:

$$ECO \text{ if notte} \quad (6.7)$$

$$T_{i,min} - e_T \leq T_i \leq T_{i,max} + e_T \quad (6.8)$$

$$ILL \leq e_L \quad (6.9)$$

L'equazione (6.7) stabilisce che durante la notte i vetri elettrocromici devono assumere lo stato più chiaro (ECO) e tale hard constraint serve essenzialmente a ridurre il costo computazionale del processo di ottimizzazione, sfruttando le caratteristiche predittive del controllo MPC solo in presenza di radiazione solare. L'equazione (6.8) invece impone un soft constraint sulla temperatura interna: è possibile, infatti, violare i limiti del range di comfort  $[T_{i,min}, T_{i,max}]$ , penalizzando però tale scelta associando un adeguato peso alla variabile  $e_T$ . Infine, l'equazione (6.9) è un soft constraint utilizzato per inglobare nella funzione di costo il daylighting (illuminamento da luce diurna).

La formulazione generale della funzione di costo del controllo MPC ha la seguente struttura:

$$\min J = \sum_{t=1}^N \|Qx_t + Ru_t\|_p \quad (6.10)$$

In cui  $x(t)$  è il vettore degli stati e  $u(t)$  il vettore degli input, entrambi dipendenti dal tempo. Q è una matrice diagonale che contiene i pesi da attribuire agli stati, mentre R contiene i pesi da attribuire agli input.

Per la formulazione della funzione di costo del caso in esami sono stati considerati come input solo le perturbanti meteo, imponendo nulla la matrice Q dei pesi degli stati. Inoltre, si è scelto di formulare due tipi di funzione di costo: il primo tiene conto nella funzione obiettivo della sola temperatura interna dell'ambiente da controllare (denominato MPC termico), il secondo invece tiene conto anche del comfort visivo sul piano di lavoro (MPC daylight).

### 6.8.2 Formulazione funzione di costo MPC Termico (MPC\_T)

La formulazione dell'MPC termico ha lo scopo di modulare la radiazione solare entrante in cella tramite il controllo dello stato del vetro al fine di mantenere la temperatura all'interno del range di comfort prestabilito (minimizzando le differenze di temperatura rispetto ad una soglia di comfort, e/o minimizzando i carichi termici di condizionamento sull'ambiente). Quindi in questo caso i constraint da considerare sono (6.7) e (6.8).

Nel caso specifico, la funzione di costo è così formulata:

$$\min J = \sum_{t=1}^N \|Ru_t\| \quad (6.11)$$

dove  $u_t$  è il vettore degli input da controllare ed R la matrice dei pesi attribuiti agli input:

$$u = [e_T, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5]^T \tag{6.12}$$

$$R = \begin{bmatrix} w(e_T) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w(\delta_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w(\delta_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w(\delta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w(\delta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w(\delta_5) \end{bmatrix} \tag{6.13}$$

$e_T$  è la variabile di errore che definisce il soft constraint (6.8), mentre  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$  sono le variabili booleane relative allo stato dei vetri definite in Tabella 34. Dunque, l'attivazione di una delle variabili corrisponde a uno stato del vetro compreso tra l'intermedio più chiaro (EC10) e lo stato di massima colorazione (EC100) e quando nessuna delle variabili booleane viene attivata allora si ha lo stato di massima trasparenza (EC0).

**Tabella 34 Combinazione delle variabili booleane per la definizione dei 6 stati dei vetri elettrocromici**

Stato EC	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
EC0	0	0	0	0	0
EC10	1	0	0	0	0
EC20	0	1	0	0	0
EC40	0	0	1	0	0
EC60	0	0	0	1	0
EC100	0	0	0	0	1

**Tabella 35 Definizione delle variabili di input della funzione di costo MPC termico**

Variabile	Tipo	Limite inferiore	Limite superiore	$w(x)$
$e_T$	Continua	0 °C	20 °C	10 K <sup>-1</sup>
$\delta_1$	Discreta	0	1	0.02
$\delta_2$	Discreta	0	1	0.04
$\delta_3$	Discreta	0	1	0.06
$\delta_4$	Discreta	0	1	0.08
$\delta_5$	Discreta	0	1	0.1

La Tabella 35 descrive le variabili di input della funzione di costo MPC termico, indicando il valore minimo e massimo del dominio di appartenenza e il peso  $w(x)$  associato alla variabile nella matrice R dell'equazione (6.13). La scelta di un range così elevato per il parametro  $e_T$  è legata alla dinamica del sistema: poiché la cella opera in free running, la temperatura è strettamente correlata alle condizioni esterne di temperatura e radiazione solare incidente ed è stato notato che in assenza di radiazione solare la temperatura interna segue il trend di quella esterna, mentre in presenza di radiazione solare l'andamento della temperatura interna si discosta dalla temperatura esterna con una differenza massima di 10°C. Per ragioni cautelative dunque si è scelto di fissare il range di variabilità massimo a 20°C, considerando che l'implementazione del controllo MPC

viene svolto nella stagione autunnale/invernale. Per penalizzare la scelta di un valore elevato di tale parametro, si è scelto però un peso elevato (di 2 ordini di grandezza superiori) rispetto al peso attribuito alle variabili booleane.

La scelta dei pesi è cruciale per una buona formulazione di un MPC, perciò il processo di definizione e calibrazione dei pesi è stato preponderante nella costruzione della funzione di costo. I valori indicati in Tabella 35 derivano infatti da uno studio parametrico preliminare in cui è stato fatto variare il valore dei pesi da attribuire alle variabili di input per valutare l'effetto sia sull'andamento della temperatura interna che sul costo computazionale del controllo. Si ricorda infatti che lo scopo della formulazione dell'MPC è l'implementazione in campo del controllo, per cui uno dei requisiti fondamentale dell'algoritmo di controllo è che il tempo computazionale deve essere minore del timestep di controllo.

I set di pesi utilizzati durante lo studio parametrico sono riportati in Tabella 36. La logica dietro la costruzione di tali set è la seguente: una volta fissato il valore della variabile  $e_T$ , sono stati definiti i pesi relativi alle booleane degli stati rispettivamente di un ordine e di due ordini di grandezza. In questo modo si forza il controllore a ridurre al minimo la differenza di temperatura dalle soglie di comfort e a prediligere invece il cambio dello stato dei vetri elettrocromici. Tra le variabili discrete è stata definita una piccola variazione in modo da forzare il controllore a scegliere sempre lo stato più chiaro tra le possibili scelte, per preferire sempre il comfort visivo degli utenti.

**Tabella 36 Set parametrico utilizzato per la calibrazione della funzione di costo MPC termico**

Variabile	Unità	Set1	Set2	Set3	Set4
$e_T$	[K <sup>-1</sup> ]	1	1	10	10
$\delta_1$	[-]	0.02	0.002	0.2	0.02
$\delta_2$	[-]	0.04	0.004	0.4	0.04
$\delta_3$	[-]	0.06	0.006	0.6	0.06
$\delta_4$	[-]	0.08	0.008	0.8	0.08
$\delta_5$	[-]	0.1	0.01	1	0.1

### 6.8.3 Formulazione funzione di costo MPC Termico e Daylight (MPC\_T+D)

La formulazione dell'MPC\_T+D ha lo scopo di modulare la radiazione solare entrante in cella tramite il controllo dello stato del vetro al fine di mantenere la temperatura all'interno del range di comfort prestabilito e garantire comfort visivo sul piano di lavoro. Per la formulazione di tale problema, si è partiti dai risultati della formulazione del MPC termico (in termine di pesi e constraints) e si è aggiunta la formulazione del problema di ottimizzazione del dominio visivo considerando il vincolo (6.9).

Il vettore degli input da controllare e la corrispondente matrice dei pesi sono indicati rispettivamente in (6.14) e in (6.15), in cui  $e_L$  è la variabile che tiene conto del daylighting, definita dal constraint (6.9).

$$u = [e_T, e_L, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5]^T \quad (6.14)$$

$$R = \begin{bmatrix} w(e_T) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w(e_L) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w(\delta_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w(\delta_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w(\delta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w(\delta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w(\delta_5) \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Per garantire il comfort visivo si è scelto di massimizzare la frazione di tempo delle ore occupate in cui l'illuminamento sul piano di lavoro di trova all'interno del range di illuminamento utile, compreso tra 300 lx e 3000 lx (range *autonomous*). Valori al di sotto di 300 lx sono troppo bassi per una buona percezione visiva (range *fell-short*), mentre valori sopra i 3000 lx producono fenomeni di abbagliamento e discomfort visivo (range *exceeded*). Per cui la funzione obiettivo deve essere in grado di distinguere i 3 diversi range, in modo da massimizzare la percentuale di ore nel range *autonomous*.

Tramite il modello di radiosity descritto al paragrafo 6.7, vengono calcolati i valori di illuminamento interno orizzontale sul piano di lavoro in funzione dei 6 stati del vetro elettrocromico e per le successive 6 ore (con timestep di controllo di 30 minuti). A partire da tali valori vengono costruite due matrici distinte: la prima identifica la condizione di *fell-short* secondo la relazione (6.16), la seconda matrice invece è composta da valori discreti 0 e 1000 a secondo la (6.17), per identificare la condizione *exceeded*:

$$ILL_{fs} = \begin{cases} 300 - lux(EC) & \text{if } lux(EC) < 300 \text{ lx} \\ 0 & \text{if } lux(EC) \geq 300 \text{ lx} \end{cases} \quad (6.16)$$

$$ILL_{ex} = \begin{cases} 1000 & \text{if } lux(EC) > 3000 \text{ lx} \\ 0 & \text{if } lux(EC) \leq 3000 \text{ lx} \end{cases} \quad (6.17)$$

in cui  $lux(EC)$  indica l'illuminamento orizzontale interno, funzione dei 6 stati dei vetri elettrocromici considerati.

Le due matrici vengono poi sommate secondo la relazione (6.18), in cui  $\beta$  è un parametro che tiene conto del peso da attribuire alla matrice dei *fell-short*.

$$ILL_{cost} = \beta \cdot ILL_{fs} + ILL_{ex} \quad (6.18)$$

Dunque, la matrice finale sarà costituita da 12 righe (numero dei timestep di controllo) e da 6 colonne (numero degli stati del vetro elettrocromico) e i valori che la compongono sono tali da identificare una determinata condizione di comfort visivo. Dalle relazioni (6.16), (6.17), (6.18) risulta infatti che:

- 0 indica la condizione di comfort visivo (range *autonomous*);
- 1000 indica la condizione di discomfort visivo (range *exceeded*);
- un valore compreso tra 0 e  $300 \cdot \beta$  indica la condizione di bassa percezione visiva (range *fell-short*);

In questo modo l'algoritmo è in grado di tenere conto dei diversi range di comfort tramite un unico valore di input, andando a privilegiare gli stati che comportano comfort visivo sul piano di lavoro e a evitare quelli che creano abbagliamento. Penalizza invece le scelte che comportano le condizioni di scarsa illuminazione da luce naturale e tale scelta deriva dalla considerazione che in presenza di poco illuminamento naturale è possibile ricorrere al sistema di illuminazione artificiale, a differenza del discomfort visivo che deve essere categoricamente evitato. Il parametro  $\beta$  dunque corrisponde al peso da attribuire al dominio di daylight nella funzione di costo, che deve essere adeguatamente stimato rispetto al dominio termico per garantire una buona formulazione della funzione di costo. L'ordine di grandezza attribuiti ai due pesi infatti serve a differenziare le priorità dei domini considerati nella funzione di costo. Per la formulazione del MPC daylight si è deciso di bilanciare i due domini attribuendo uguali priorità al comfort termico e a quello visivo: considerando che il peso del campo termico è pari a  $10K^{-1}$  (cfr. Tabella 35) si è scelto di attribuire al dominio visivo un peso pari a  $\beta = 0.1 \text{ lx}^{-1}$  in modo che il valore della matrice *fell-short* vari da 0 a 30. In tal modo dunque il processo decisionale tenderà a favorire gli stati del vetro che implicano condizioni di comfort visivo e temperatura all'interno del range di comfort termico e quando questo non può essere garantito si andranno a scegliere stati che comportano condizioni che minimizzano la differenza dai valori soglia dei range di comfort. La condizione di discomfort visivo deve però essere evitata: infatti, scegliendo un valore pari a 1000 il discomfort visivo ha un peso maggiore rispetto al discomfort termico e di fatto questo è un hard constraint del sistema. Avendo scelto di fornire in input al controllore la matrice di costo degli illuminamenti è stato attribuito peso unitario alla variabile di errore  $e_L$ , così come riportato in Tabella 37.

**Tabella 37 Definizione delle variabili di input della funzione di costo MPC daylight**

Variabile	Tipo	Limite inferiore	Limite superiore	Peso
$e$	Continua	0 °C	20 °C	10 K <sup>-1</sup>
$e_l$	Continua	0	1000	1
$\delta_1$	Discreta	0	1	0.02
$\delta_2$	Discreta	0	1	0.04
$\delta_3$	Discreta	0	1	0.06
$\delta_4$	Discreta	0	1	0.08
$\delta_5$	Discreta	0	1	0.1

In questo caso, l'algoritmo decisionale è in grado di prevedere le implicazioni delle sequenze di stati del vetro sia sul trend della temperatura interna che sul comfort visivo e questo aspetto risulta particolarmente interessante a causa della natura spesso contrastante tra comfort termico e comfort visivo: ad esempio in giornate di mezza stagione in presenza di radiazione solare, il dominio termico tenderà a scurire il vetro per evitare fenomeni di surriscaldamento e al tempo stesso il dominio visivo tenderà invece a massimizzare la quantità di luce naturale entrante scegliendo lo stato del vetro più chiaro.

### 6.9 Architettura simulativa nel contesto dell'MPC decision making

Al fine di implementare a livello simulativo le strategie di controllo MPC, è stata sviluppata un'architettura ad hoc basata sulla co-simulazione del modello energetico della TWINS basato su EnergyPlus (Digital Twin) con l'algoritmo del MPC in Matlab. Ad ogni timestep di controllo (30 minuti) è richiesto il vettore delle condizioni della cella insieme alle previsioni delle perturbanti meteorologiche delle successive 6 ore; a partire da tali informazioni, l'algoritmo sceglie la sequenza di stati che ottimizza la funzione di costo e invia l'azione di controllo ottimale al modello di EnergyPlus che lo applica al modello energetico della cella al timestep successivo.

L'architettura sviluppata è basata sul software Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) che permette lo scambio di informazioni tra EnergyPlus e Matlab: ad ogni timestep simulativo, BCVTB arresta la simulazione di EnergyPlus per eseguire l'ottimizzazione su Matlab e permette lo scambio di informazioni tra i due software. Nello specifico, ad ogni timestep l'architettura simulativa attua i seguenti passaggi:

1. EnergyPlus esegue la simulazione termica durante un singolo timestep e mette in pausa la simulazione;
2. Tramite il modello di daylight (cfr. paragrafo 6.7) vengono calcolati i valori di illuminamento interno in funzione dei 6 stati dei vetri elettrocromici e per le successive 6 ore.
3. Matlab riceve il valore della temperatura interna da EnergyPlus, insieme alla previsione delle perturbanti del sistema e dei valori di illuminamento ed effettua l'ottimizzazione della funzione di costo;
4. Terminata l'ottimizzazione, Matlab invia a EnergyPlus lo stato dei vetri elettrocromici deciso dal controllore;
5. EnergyPlus sovrascrive lo stato dei vetri tramite l'Energy Management System (EMS) e la simulazione procede al timestep successivo.

L'architettura simulativa è stata il punto di partenza per la costruzione dell'infrastruttura sperimentale necessaria per l'implementazione in campo dell'MPC. L'infrastruttura è basata su Python che fa da

coordinatore di tutte le attività necessarie all'attuazione del controllo in campo garantendo la sincronizzazione di tutti i componenti e i processi simulativi. Per garantire il corretto funzionamento del sistema di controllo, è infatti indispensabile che tutti gli step metodologici siano rispettati e sincronizzati tra di loro. Nello specifico, è stato necessario collegare la workstation (che esegue l'ottimizzazione della funzione di costo) al sistema di acquisizione della cella e al controllore locale dei vetri elettrocromici. L'implementazione del controllo in campo si articola dunque nelle seguenti fasi:

1. Il sistema di acquisizione salva su FTP i dati relativi alle condizioni interne della cella di prova;
2. Il controllore scarica i dati relativi alle condizioni interne ed esterne alla TWINS: ricava la temperatura media interna in quel dato timestep e scarica dai servizi meteo le previsioni meteo delle successive 6 ore;
3. A partire dalla predizione delle disturbanti, Python utilizza il modello di daylight (cfr. sezione 6.7) per predire il valore degli illuminamenti nei punti di osservazione e crea la matrice di costo degli illuminamenti necessaria alla formulazione dell'MPC<sub>T+D</sub>;
4. Conoscendo le variabili di stato del sistema e le predizioni delle disturbanti, Python lancia l'algoritmo del MPC eseguito su Matlab che minimizza la funzione costo durante l'horizon control;
5. Terminata l'ottimizzazione, Python legge lo stato del vetro deciso dal MPC e manda il corrispettivo livello di colorazione al controllore locale dei vetri elettrocromici tramite API.

Uno dei requisiti fondamentali per l'implementazione in campo è che il tempo computazionale del controllo deve essere minore del timestep di controllo (nel caso in esame 30 minuti). Tutte le fasi descritte al paragrafo precedente sono svolte dalla workstation (con processore Intel Core i5 @3.2 GHz e 8GB di RAM) e le fasi con il più alto costo computazionale sono le fasi 3 e 4. Per ridurre al minimo il tempo computazionale necessario alla minimizzazione della funzione di costo (fase 4), è stato installato il software di ottimizzazione CPLEX. Utilizzando l'ottimizzatore, il controllore è in grado di svolgere il workflow di controllo in meno di 4 minuti ed è stato rilevato che l'ottimizzazione del MPC<sub>T</sub> è più veloce rispetto a quella del MPC<sub>T+D</sub> di un minuto. Invece a livello simulativo, BCVTB impiega un tempo che varia dalle 4 ore (MPC<sub>T</sub>) alle 8 ore (MPC<sub>T+D</sub>) per effettuare l'ottimizzazione della funzione di costo su un run period di 9 giorni (utilizzando anche in questo caso l'ottimizzatore CPLEX).

### 6.10 Controlli RBC benchmark di confronto

Le due strategie MPC precedentemente descritte vengono implementate in campo nella cella di prova TWINS. Avendo a disposizione un'unica cella di prova e volendo comparare le 2 strategie di controllo in base a degli opportuni indicatori di performance, è stata utilizzata la seguente metodologia: si implementa in campo una delle due strategie MPC e si utilizza la Digital Twin per simulare l'effetto del controllo della seconda strategia sull'ambiente interno. In particolare, nella Digital Twin vengono riprodotte le stesse condizioni meteo della cella reale, andando a modificare il file climatico con le variabili meteorologiche rilevate dalla stazione meteo (cfr. sezione 6.7).

Inoltre, la stessa strategia MPC implementata in campo viene implementata anche a livello simulativo utilizzando il file climatico reale e con due diversi tipi di predizione per le disturbanti: predizione reale e predizione perfetta. La predizione reale (indicata con l'acronimo PR) si riferisce agli stessi dati di forecast utilizzati dal MPC implementato in campo, la predizione perfetta (indicata con l'acronimo PP) viene invece ricavata in post-processing a partire dai dati misurati in campo per cui corrisponde alla condizione di massima accuratezza delle previsioni. Si noti che l'utilizzo dei due diversi dataset di predizione fornisce un'indicazione sull'incidenza dell'accuratezza delle predizioni sulla performance dei controlli predittivi e dunque su quanto sia importante utilizzare dati forecast altamente accurati per il corretto funzionamento di tali controlli avanzati.

Inoltre, la Digital TWIN viene utilizzata per implementare a livello simulativo diverse strategie di controllo di tipo Rule Based (RBC), in modo da ottenere dei risultati di riferimento per MPC e valutarne l'efficacia delle strategie in termini di performance. In particolare, sono definiti due casi di riferimento che considerano la facciata statica in cui i vetri elettrocromici si trovano rispettivamente nello stato di massima trasparenza (caso EC0) e massima colorazione (caso EC100). Oltre ai 2 casi di benchmark, vengono poi definite delle strategie di controllo RBC di tipo open-loop che utilizzano come variabile di controllo la radiazione solare incidente o l'illuminamento:

- **Rad300:** in assenza di occupanti il vetro è mantenuto allo stato chiaro. In presenza di occupanti esso assume una percentuale di colorazione definita dall'intervallo in cui si trova l'irradianza globale verticale su finestra. Quando l'Irradianza supera i  $100 \text{ W/m}^2$  il vetro comincia a scurirsi, fino a raggiungere il 100% della colorazione a  $300 \text{ W/m}^2$ . In Tabella 38 sono riportati gli intervalli di Irradianza con il relativo stato del vetro.
- **Rad500:** in assenza di occupanti il vetro è mantenuto allo stato chiaro. In presenza di occupanti esso assume una percentuale di colorazione definita dall'intervallo in cui si trova l'irradianza globale verticale su finestra. Quando l'Irradianza supera i  $250 \text{ W/m}^2$  il vetro comincia a scurirsi, fino a raggiungere il 100% della colorazione a  $500 \text{ W/m}^2$ . In Tabella 38 sono riportati gli intervalli di Irradianza con il relativo stato del vetro.
- **Daylight:** viene definito un punto di controllo per l'illuminamento su piano di lavoro posto a 1.9 m dalla facciata e a 0.8 m di altezza e un filtro geometrico che dalla posizione solare identifichi i momenti in cui il punto di misura è raggiunto dalla radiazione diretta. In tali momenti viene settato lo stato di colorazione per il quale il valore di illuminamento orizzontale interno risulti inferiore al valore di  $3000 \text{ lx}$ , soglia di discomfort individuata da [26].
- **Daylight\_Te:** viene definito un punto di controllo per l'illuminamento su piano di lavoro posto a 1.9 m dalla facciata e a 0.8 m di altezza e un filtro geometrico che dalla posizione solare identifichi i momenti in cui il punto di misura è raggiunto dalla radiazione diretta. In tali momenti se la temperatura esterna è inferiore a  $16^\circ\text{C}$  viene settato lo stato di colorazione per il quale il valore di illuminamento orizzontale interno risulti inferiore al valore di  $3000 \text{ lx}$ . Se la temperatura esterna è maggiore di  $16^\circ\text{C}$  viene settato lo stato più scuro che mantiene l'illuminamento nell'intervallo di "luce utile"  $300 - 3000 \text{ lx}$ .

In tutti i controlli l'attuazione viene effettuata ogni 30 minuti, mentre il risultato è restituito ogni 10 minuti. Essi sono stati simulati utilizzando il file climatico corrente, ovvero modificato con i dati climatici misurati in campo (vedere sezione 6.7).

**Tabella 38: Soglie di cambiamento stato vetro elettrocromico - RBC**

RBC	EC0	EC10	EC20	EC40	EC60	EC100
Rad300	0 - $100 \text{ W/m}^2$	$100 \text{ W/m}^2$	$150 \text{ W/m}^2$	$200 \text{ W/m}^2$	$250 \text{ W/m}^2$	$300 \text{ W/m}^2$
Rad500	0 - $250 \text{ W/m}^2$	$250 \text{ W/m}^2$	$300 \text{ W/m}^2$	$350 \text{ W/m}^2$	$450 \text{ W/m}^2$	$500 \text{ W/m}^2$

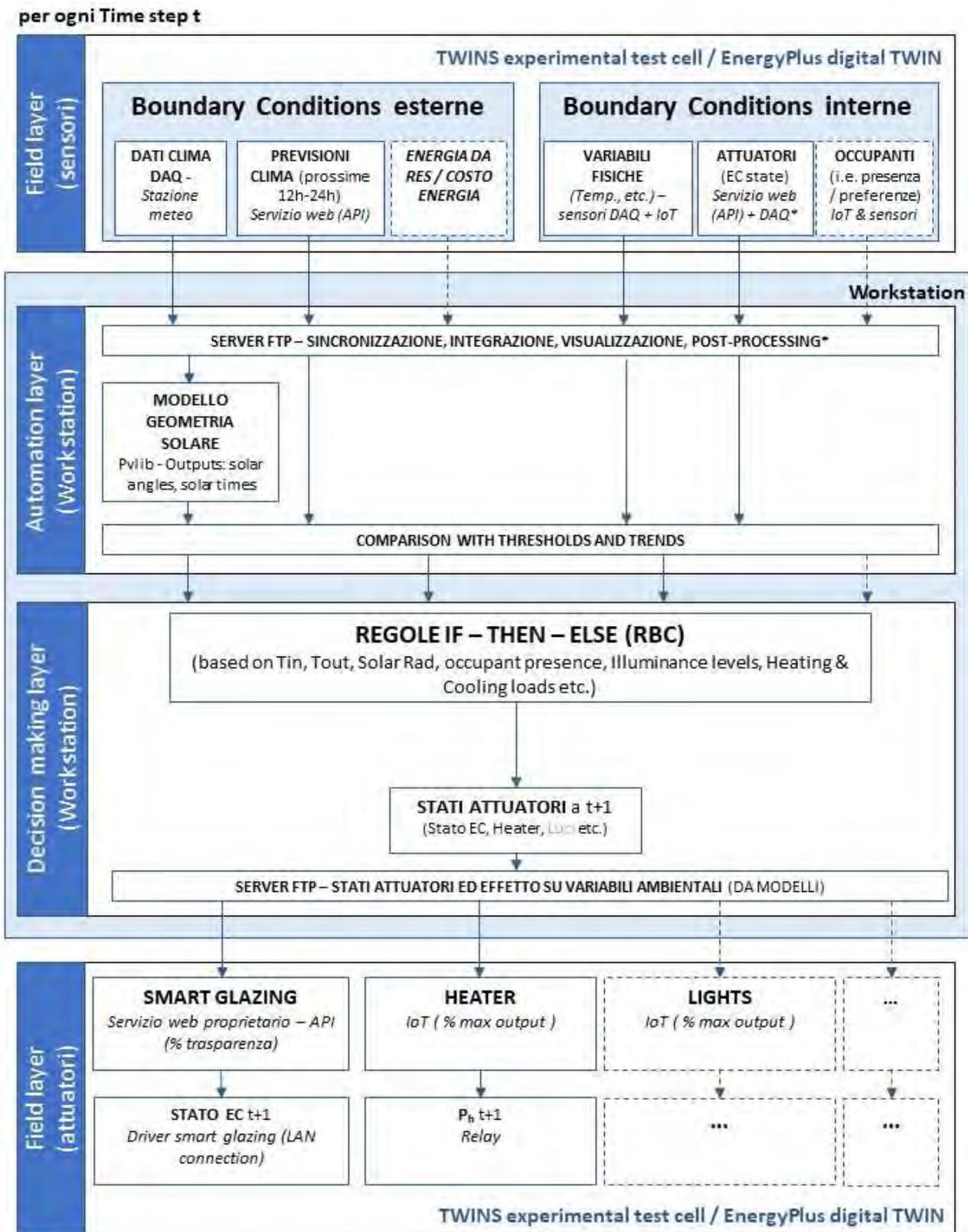


Figura 59. Infrastruttura sperimentale e architettura di controllo per i controlli RBC (semplificazione della Figura 48).

### 6.11 Risultati della campagna sperimentale e confronti con simulazioni

In questa sezione vengono presentati i risultati della campagna sperimentale e i relativi confronti con risultati ottenuti tramite simulazione. La Tabella 39 riassume in modo sintetico i 3 diversi dataset che si andranno ad analizzare, indicando l'inizio e la fine del periodo considerato, la funzione di costo utilizzata dall'MPC, il range della temperatura interna e la modalità di controllo del riscaldatore elettrico.

**Tabella 39 Descrizione dei dataset inerenti l'implementazione sperimentale del MPC**

Dataset	Inizio	Fine	MPC objective		Ti min	Ti max	Temperatura setpoint Heating control
			max CH	max UDI <sub>a</sub>			
Ottobre	24/10/2021	02/11/2021	Yes	No	20	26	free running
Novembre	18/11/2021	25/11/2021	Yes	Yes	20	26	free running
Dicembre	06/12/2021	14/12/2021	Yes	Yes	20	23	20°C

Per confrontare la performance dei diversi controlli, sono stati scelti degli indicatori che tengono conto sia dell'aspetto termico che del comfort visivo in ambiente:

- *Useful Daylight Illuminance fell-short - UDI<sub>fs</sub>* [%] indica la percentuale di tempo delle ore occupate in cui l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro è inferiore a 100 lx;
- *Useful Daylight Illuminance supplementary - UDI<sub>s</sub>* [%] indica la percentuale di tempo delle ore occupate in cui l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro è all'interno del range 100 - 300 lx;
- *Useful Daylight Illuminance autonomous - UDI<sub>a</sub>* [%] indica la percentuale di tempo delle ore occupate in cui l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro è all'interno del range 300 - 3000 lx;
- *Useful Daylight Illuminance exceeded UDI<sub>e</sub>* [%] indica la percentuale di tempo delle ore occupate in cui l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro è superiore a 3000 lx;
- Comfort hours - CH [%] indica la percentuale di tempo delle ore occupate in cui la temperatura si trova all'interno del range di comfort 20 - 26°C;
- Overheating hours - OH [%] indica la percentuale di tempo delle ore occupate in cui la temperatura è maggiore di 26°C;
- Weighted overheating degree hours – WOD [°C h] è la somma, durante il periodo occupato, della differenza tra la temperatura interna e 26°C, quando la temperatura interna si trova al di sopra di tale soglia;
- E<sub>L</sub> [Wh/m<sup>2</sup>] è il fabbisogno di energia primaria (stimato) per unità di superficie dell'impianto di illuminazione che ha lo scopo di garantire 500 lx sul piano di lavoro;
- E<sub>H</sub> [Wh/m<sup>2</sup>] è il fabbisogno di energia primaria per unità di superficie del riscaldatore elettrico (quando utilizzato);

L'UDI è il parametro relativo al comfort visivo ed in particolare occorre massimizzare il valore di UDI<sub>a</sub> per garantire adeguati livelli di illuminamento sul piano di lavoro tramite luce naturale; il fabbisogno dell'impianto di illuminazione, dunque, quantifica l'energia richiesta dall'impianto per integrare il daylight. Gli indicatori inerenti il comfort termico sono invece CH OH e WOD: la migliore strategia di controllo dal punto di vista termico è quella che tende a massimizzare CH e a minimizzare il parametro WOD. CH infatti indica la percentuale di tempo in cui sono rispettati i constraints termici (temperatura all'interno dell'intervallo di comfort termico), WOD invece quantifica l'intensità del discomfort termico durante le ore occupate. L'efficienza globale di riscaldamento è stata considerata pari a 0.85, mentre per il coefficiente di conversione da energia elettrica a energia primaria è stato considerato un valore pari a 2.42.

### 6.11.1 Dataset Ottobre

La Figura 60 e 61 mostrano l'andamento delle principali variabili durante il periodo considerato, partendo dall'alto verso il basso, sono riportati:

- a. lo stato dei vetri elettrocromici deciso dall'algoritmo decisionale (per diversi casi, in nero tratteggiato quello implementato in campo);
- b. l'andamento della temperatura interna (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo);
- c. le disturbanti meteo del sistema (la temperatura esterna, in verde e la radiazione solare incidente sulla facciata, in rosso);
- d. l'andamento dell'illuminamento interno orizzontale sul piano di lavoro (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo).

Nella Figura 60 sono confrontati i dati relativi a 3 strategie di MPC con solo l'obiettivo di ridurre il discomfort termico (MPC\_T) sperimentali (MPC\_T\_exp) con le strategie MPC simulate con predizione reale (MPC\_T\_PR) e con perfetta conoscenza delle disturbanti (MPC\_T\_PP). In alternativa nella Figura 61 sono confrontati i soli risultati delle simulazioni, confrontando MPC con obiettivi diversi ma entrambe con conoscenza perfetta delle disturbanti climatiche (MPC\_T\_PP e MPC\_T+D\_PP) con l'output dei migliori RBC per questo periodo (RBC\_Daylight e RBC\_500).

Analizzando il comportamento dei vetri, dalla Figura 60, è possibile notare che il controllore sceglie uno schema più o meno standard per il controllo dei vetri elettrocromici: durante i giorni caratterizzati da cielo sereno e alta temperatura esterna, l'algoritmo decisionale sceglie di mantenere i vetri elettrocromici nello stato di massima trasparenza fino a quando la temperatura interna non supera la soglia di comfort di 20°C per poi scurire preventivamente il vetro nello stato di massima colorazione in modo da non favorire il fenomeno del surriscaldamento. In presenza di bassa radiazione solare e bassa temperatura esterna, il controllore lascia invece i vetri elettrocromici nella configurazione più chiara per massimizzare l'apporto di radiazione solare in ambiente; in presenza invece di alta temperatura e cielo nuvoloso (24 ottobre), la scelta del controllore è variabile in modo da scegliere sempre lo stato di colorazione più chiara tra le possibili scelte, per preferire il comfort visivo degli utenti.

Per valutare la robustezza del controllore in campo, vengono riportati sullo stesso grafico i risultati simulativi ottenuti utilizzando la stessa funzione obiettivo e i due diversi dataset predittivi descritti nella sezione 6.10: in blu sono riportati i risultati del MPC termico con predizione perfetta (che deriva dalla conoscenza perfetta delle predizioni, MPC\_T\_PP) e in arancione i risultati del MPC termico con predizione reale (che coincide con la predizione utilizzata dal MPC sperimentale, MPC\_T\_PR). La scelta degli stati del vetro di quest'ultimo controllore sono in linea con le scelte del MPC implementato in campo (MPC\_T\_exp) e ciò dimostra dunque la robustezza del workflow sperimentale (cfr. paragrafo 6.9) indispensabile per una buona riuscita del controllo predittivo. Dal confronto dei risultati ottenuti dalla simulazione del MPC\_T\_PP, è possibile notare che la conoscenza perfetta della predizione comporta un anticipo di due ore della scelta rispetto al controllo implementato in campo. Questo dimostra che i risultati dell'ottimizzazione sono strettamente correlati con l'accuratezza della predizione delle disturbanti e dunque occorre scegliere in modo scrupoloso la fornitura delle predizioni per garantire elevate prestazioni del MPC. Esistono infatti diverse soluzioni per i dati forecast, come ad esempio servizi meteo dedicati (come nel caso in esame) o modelli matematici di regressione (come i modelli ARMAX) o basati su machine learning.

Si nota inoltre che in tutti i casi analizzati è presente la condizione di surriscaldamento (temperatura interna superiore a 26°C) durante i giorni di elevata radiazione solare incidente e questo dimostra che nel sistema in esame il solo controllo della radiazione solare tramite i vetri dinamici non è sufficiente a garantire condizioni di comfort termico dell'ambiente; inoltre la TWINS è composta da componenti molto leggeri che hanno poca capacità di accumulo del calore e questo è un elemento che limita lo sfruttamento delle proprietà predittive del controllo utilizzato.

La Figura 61 confronta il comportamento del MPC\_T\_PP con i risultati simulativi del MPC termico e daylight (MPC\_T+D\_PP) e alcuni dei i controlli RBC descritti nella sezione 6.10. Il controllo MPC\_T+D\_PP opera in modo differente rispetto al MPC\_T\_PP: nei giorni di cielo sereno ed alta temperatura, il controllore sceglie infatti lo stato più scuro dei vetri dinamici solo durante le ore centrali del giorno per evitare discomfort visivo; inoltre predilige un passaggio graduale tra lo stato più chiaro e più scuro del vetro per massimizzare la percentuale di tempo entro cui l'illuminazione ricade all'interno dell'intervallo di "luce utile" 300-3000 lx. Tale comportamento però non va a ripercuotersi sul dominio termico, in quanto la percentuale di comfort termico nel caso MPC\_T+D\_PP differisce di un solo punto percentuale rispetto al MPC termico.

Il controllo RBC\_daylight\_Te è il controllo che ha prestazioni peggiori dal punto di vista del comfort termico: si nota infatti che con tale controllo la temperatura dell'aria interna raggiunge valori più elevati rispetto agli altri controlli (con una differenza massima di 4°C) e questo è dovuto essenzialmente alla variabile di controllo della strategia RB. Infatti, tale controllo è basato principalmente sul valore di illuminamento orizzontale del punto di osservazione (posto a 1.9 m dalla facciata ad un'altezza di 0.8 m) e su un filtro geometrico che identifica se il sensore è colpito da radiazione solare diretta. Data la geometria del sistema e la località della TWINS, accade che in alcuni periodi del giorno il controllore sceglie di schiarire il vetro anche in presenza di elevata radiazione solare perché in quell'istante il sensore di illuminamento non è raggiunto da radiazione diretta. Questo aumenta la probabilità di surriscaldamento dell'ambiente interno, migliorando però le prestazioni del comfort visivo. Il controllo RBC\_Rad500 supera tale limitazione: basando la scelta sui valori di radiazione solare incidente sulla facciata, è in grado di controllare in maniera più efficace la temperatura interna (riducendo il surriscaldamento) evitando al contempo anche il discomfort visivo sul piano di lavoro. Inoltre ha un costo computazionale più basso del RBC\_daylight\_Te perché non richiede il calcolo del filtro geometrico solare.

**Tabella 40 Confronto KPIs dataset ottobre**

Strategia di controllo	UDI-fs [%]	UDI-s [%]	UDI-a [%]	UDI-e [%]	Comfort hours [%]	Overheating hours [%]	Weighted overheating degree hours[°C h]	EP <sub>l</sub> [Wh/m <sup>2</sup> ]
ECO	28%	19%	31%	23%	8%	33%	243.6	92.9
EC100	54%	17%	27%	3%	19%	19%	51.0	154.3
RBC_Daylight	28%	19%	46%	7%	13%	27%	114.3	93.1
RBC_Daylight_Te	28%	19%	47%	6%	13%	27%	104.5	93.1
RBC_Rad300	28%	28%	42%	3%	19%	19%	52.2	101.2
RBC_Rad500	28%	19%	50%	3%	18%	21%	56.9	93.1
MPC_T_PP	31%	27%	39%	3%	20%	19%	48.7	108.6
MPC_T_PR	<b>28%</b>	<b>23%</b>	<b>43%</b>	<b>6%</b>	<b>16%</b>	<b>25%</b>	<b>65.0</b>	<b>97.4</b>
MPC_T+D_PP	28%	20%	49%	3%	19%	21%	57.8	93.6
MPC_T_exp	<b>28%</b>	<b>20%</b>	<b>35%</b>	<b>17%</b>	<b>20%</b>	<b>17%</b>	<b>36.8</b>	<b>93.6</b>

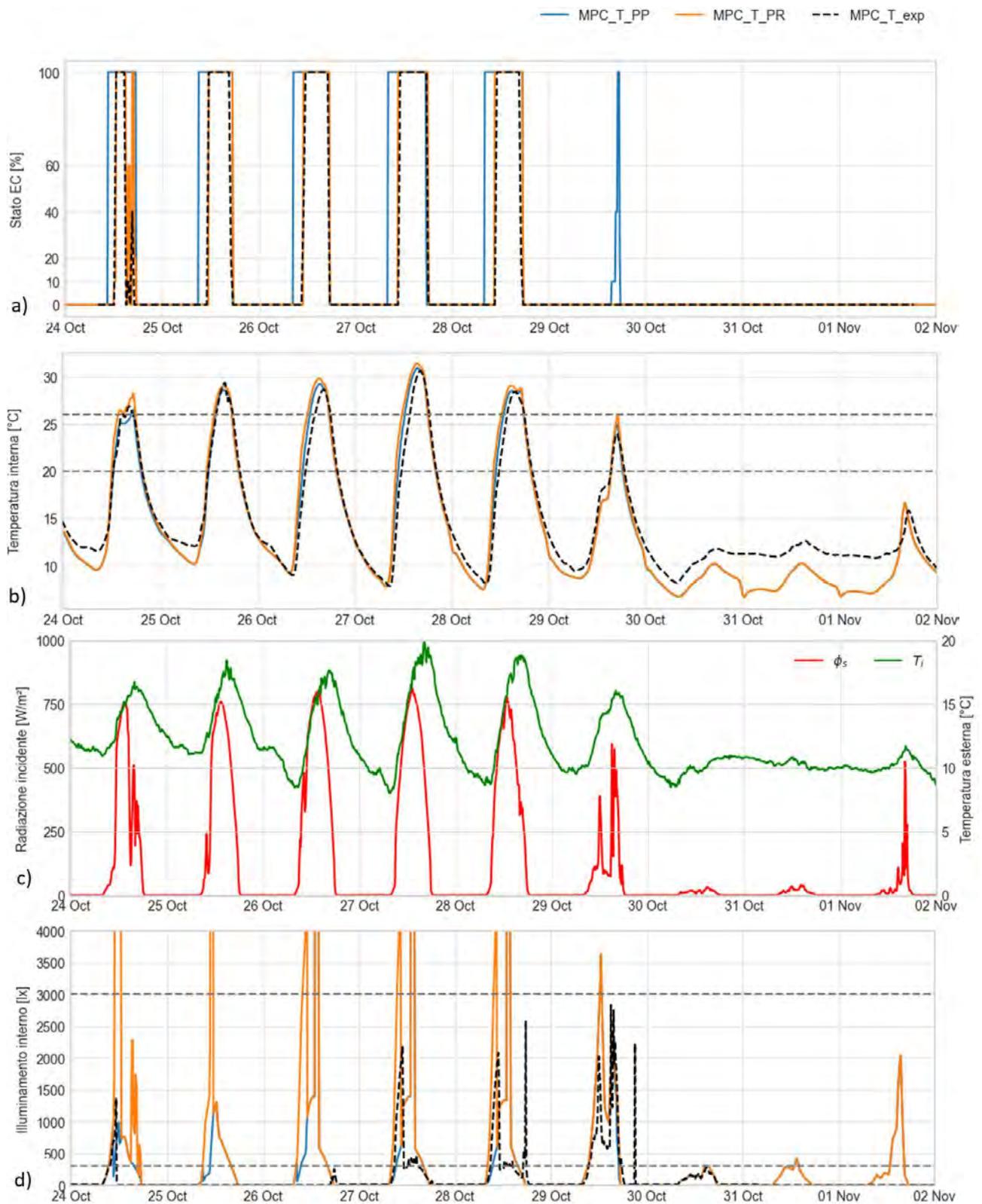


Figura 60 Confronto tra MPC termico sperimentale e MPC termico simulativo con predizione perfetta e reale dataset ottobre

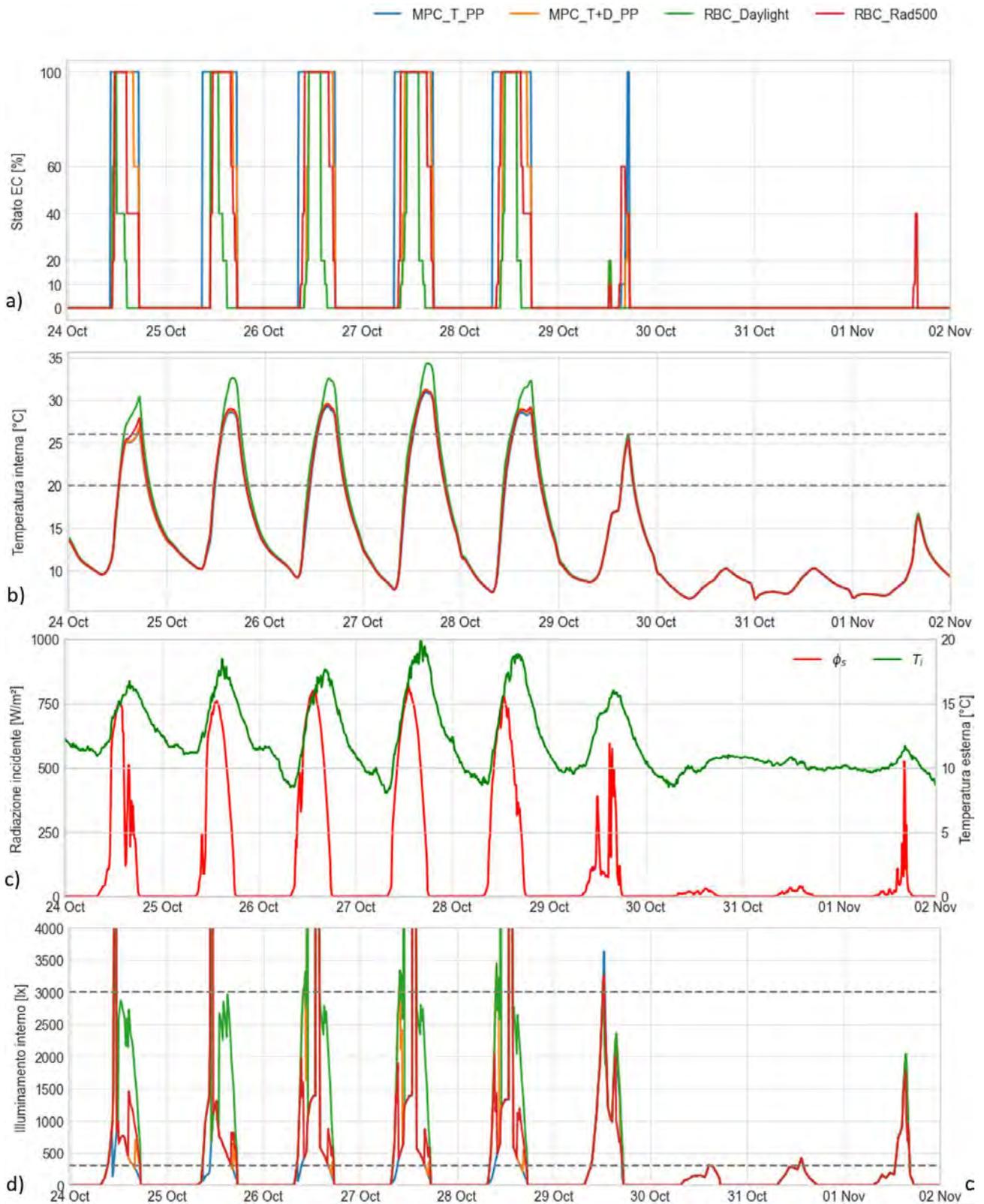


Figura 61 Confronto simulativo delle strategie di controllo, database ottobre

La Tabella 40 riassume gli indicatori prestazionali dei controlli implementati e la Figura 62 mostra come variano le prestazioni delle diverse strategie di controllo. Sull'asse delle ascisse sono riportati i gradi ora di surriscaldamento, mentre sull'asse delle ordinate viene riportata la percentuale di tempo delle ore di occupazione in cui il valore di illuminamento è inferiore a 300 lux (a sinistra) e superiore a 3000 lux (a destra). In questo modo, il controllo con prestazioni migliori è quello più vicino all'origine degli assi perché corrisponde al controllo che massimizza sia la performance visiva che termica.

Dai grafici di Figura 62 si evince dunque che il controllo RBC\_Rad500 ha prestazioni migliori durante il periodo considerato, seguito di poco dal MPC daylight. L'MPC termico si dimostra il migliore dal punto di vista del comfort termico con la più alta percentuale di tempo in cui la temperatura si trova all'interno del range di comfort. Come è stata già anticipato, l'accuratezza della predizione influenza la performance del controllo MPC; infatti confrontando le ore di comfort tra MPC termico con le due diverse predizioni, l'utilizzo della predizione reale ha comportato una diminuzione di 4 punti percentuali rispetto alla predizione perfetta. MPC\_T+D tramite il constraint del daylight ha aumentato di ben 10 punti percentuali il valore del UDI-a, a dimostrazione del fatto che è stato ottenuto un buon bilanciamento tra il dominio termico e quello visivo.

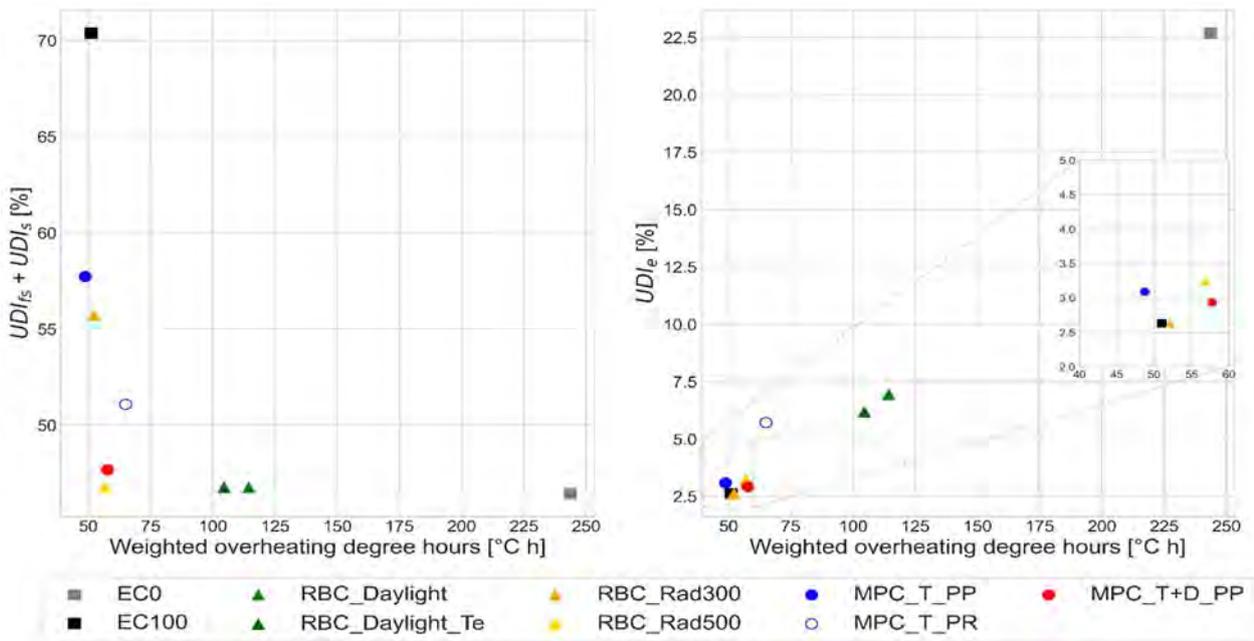


Figura 62 Confronto KPIs dataset ottobre: andamento degli indicatori in funzione dei gradi ora di surriscaldamento e somma degli UDI fell-short e supplementary (a sinistra), gradi ora di surriscaldamento e UDI exceeded (a destra)

### 6.11.2 Dataset Novembre

La Figura 63 e 64 mostrano l'andamento delle principali variabili durante il periodo considerato, partendo dall'alto verso il basso, sono riportati:

- a. lo stato dei vetri elettrocromici deciso dall'algoritmo decisionale (per diversi casi, in nero tratteggiato quello implementato in campo);
- b. l'andamento della temperatura interna (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo);
- c. le disturbanti meteo del sistema (la temperatura esterna, in verde e la radiazione solare incidente sulla facciata, in rosso);
- d. l'andamento dell'illuminamento interno orizzontale sul piano di lavoro (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo).

Nella Figura 63 sono confrontati i dati relativi a 3 strategie di MPC con solo l'obiettivo di ridurre il discomfort termico (MPC\_T) sperimentali (MPC\_T\_exp) con le strategie MPC simulate con predizione reale (MPC\_T\_PR) e con perfetta conoscenza delle disturbanti (MPC\_T\_PP). In alternativa nella Figura 64 sono confrontati i soli risultati delle simulazioni, confrontando MPC con obiettivi diversi ma entrambe con conoscenza perfetta delle disturbanti climatiche (MPC\_T\_PP e MPC\_T+D\_PP) con l'output dei migliori RBC per questo periodo (RBC\_Daylight e RBC\_500).

Durante il dataset di novembre è stato implementato in campo MPC\_T+D con lo scopo di mantenere la temperatura interna all'interno dei range di comfort 20°C e 26°C e massimizzare la percentuale delle ore occupate dell'UDI-a. La Figura 63 mostra lo stato del vetro scelto dal MPC\_T+D\_exp e l'effetto di tale scelta nell'ambiente interno, in termini di temperatura interna e illuminamento orizzontale sul piano di lavoro. Il periodo di implementazione del MPC daylight è caratterizzato da temperatura esterna bassa e cielo coperto con ridotta radiazione solare per cui l'obiettivo del controllore è stato quello di massimizzare gli apporti solare provenienti dalla facciata per innalzare la temperatura interna. Le condizioni meteo sono state abbastanza estreme limitando quindi la buona riuscita del controllo in campo; poiché la TWINS opera in free running, il controllore può agire solo sul controllo della radiazione solare e in mancanza di questa quindi comporta valori di temperatura interna minori del limite di comfort termico. Inoltre la cella di prova è costituita da materiali leggeri con bassa capacità termica che limitano i vantaggi delle caratteristiche predittive del controllo.

L'implementazione del controllo in campo in condizioni meteo di tipo invernale ha comportato quindi valori di temperatura interna quasi sempre al di sotto della soglia limite di comfort termico e buoni valori di illuminamento interno. Seppure l'implementazione abbia avuto un effetto poco soddisfacente sull'ambiente interno, tale attività ha fatto emergere comunque due aspetti interessanti: innanzitutto, il controllore sceglie stati più scuri del vetro anche quando la temperatura si trova al di sotto della soglia limite; tale risultato è dovuto alla formulazione della funzione di costo in cui si è dato lo stesso peso al dominio termico e a quello visivo. Nelle ore centrali del giorno in cui è prevista radiazione diretta il controllore va dunque a preferire stati più scuri per evitare fenomeni di abbagliamento da luce naturale. La seconda considerazione è legata all'accuratezza delle disturbanti: è stato notato che in presenza di cielo variabile prevalentemente nuvoloso, l'accuratezza delle previsioni delle disturbanti diminuisce drasticamente e questo si traduce in una riduzione delle performance del controllo; confrontando infatti l'MPC implementato in campo (linea nera tratteggiata) con MPC\_T+D\_PP (in arancione) in Figura 63, si vede infatti che i due algoritmi attuano due diverse sequenze di stato del vetro soprattutto nei giorni 19 e 20 novembre e ciò è dovuto a una diversa previsione delle condizioni: infatti a differenza di quanto è avvenuto in campo, MPC\_T+D\_PP ha preferito mantenere lo stato di massima trasparenza nei giorni in esame per massimizzare l'apporto di radiazione solare dal momento che il constraint visivo risultava rispettato.

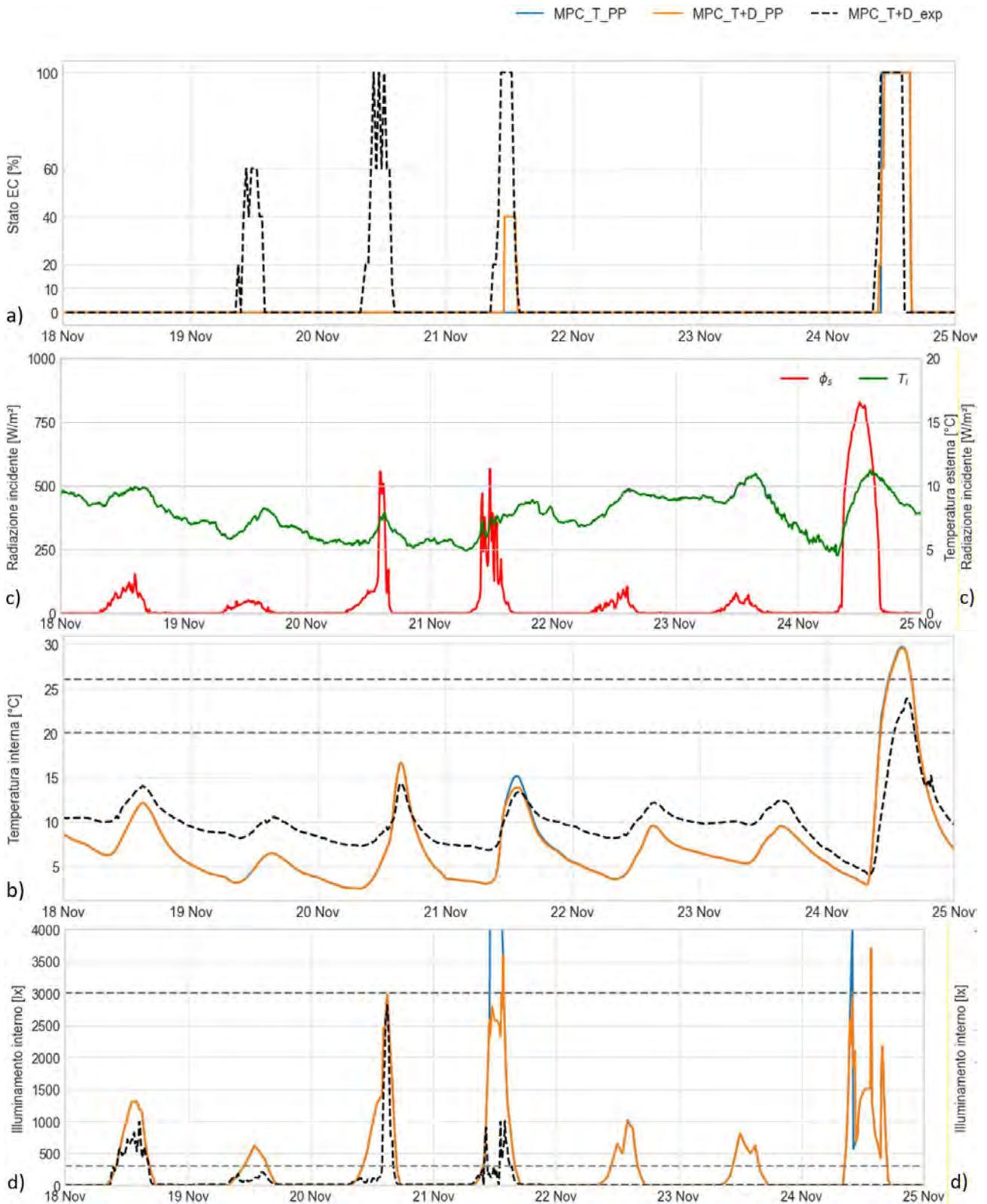
La Figura 64 confronta i controlli MPC e RBC implementati a livello simulativo. Anche in questo caso si ha un comportamento poco soddisfacente in termini di temperatura interna, dovuto essenzialmente alle condizioni di cielo coperto che comporta riduzione di radiazione solare trasmessa in ambiente. Tutti i controlli infatti

tendono a preferire lo stato più chiaro per massimizzare l’apporto solare attraverso la facciata trasparente. Inoltre, durante l’unico giorno di cielo sereno (24 novembre) si verifica in tutti i casi il fenomeno del surriscaldamento con massimi di temperatura variabili a seconda della strategia di controllo implementata. Il controllo RBC\_Rad500 sceglie di scurire il vetro non appena la radiazione solare oltrepassa la soglia dei 500 W/ m<sup>2</sup> (alle ore 10), mentre MPC\_T\_PP invece attua la stessa scelta quando la temperatura interna supera la soglia dei 22°C (alle ore 11); tutti gli altri controlli invece decidono di scurire il vetro alle 12. Questo si traduce in un andamento della temperatura diverso a seconda dei controlli implementati e tra questi il RBC\_Rad500 si attesta come il controllo migliore dal punto di vista termico, come viene riportato in Tabella 41. Per quanto riguarda invece l’aspetto visivo, dai grafici si nota che in presenza di radiazione solare il controllo MPC\_T+D ha prestazioni migliori in quanto è in grado di evitare abbagliamento sul piano di lavoro durante tutto il periodo considerato.

La Tabella 41 e Figura 65 riportano in modo sintetico gli indicatori di performance. A parte i controlli di benchmark, gli indicatori di performance dei diversi controlli sono tutti paragonabili tra di loro. Si noti che RBC\_Daylight e RBC\_Daylight\_Te hanno lo stesso comportamento dato che la temperatura esterna è sempre minore di 16°C. Anche in questo caso il controllo RBC\_Daylight è il peggiore dal punto di vista termico, basando infatti lo stato del vetro sul valore di illuminamento interno non tiene conto del dominio termico. MPC\_T+D\_PP risulta essere uno dei migliori controlli analizzati, insieme a RBC\_Rad300: entrambi sono in grado di azzerare la percentuale di ore in presenza di abbagliamento, massimizzando le ore in cui l’illuminamento si trova all’interno della soglia utile. Dal punto di vista termico però il RBC\_Rad300 ha prestazioni migliori, dovuto essenzialmente al differente comportamento dei controlli durante il giorno con elevata radiazione solare (24 novembre).

**Tabella 41 Confronto KPIs strategie di controllo database novembre**

Control	UDI-fs [%]	UDI-s [%]	UDI-a [%]	UDI-e [%]	Comfort hours [%]	Overheating hours [%]	Weighted overheating degree hours[°C h]	EP <sub>L</sub> [Wh/m <sup>2</sup> ]
ECO	35%	14%	41%	10%	2%	7%	55.0	82.1
EC100	70%	17%	13%	0%	3%	4%	6.2	151.9
RBC_Daylight	35%	14%	49%	2%	3%	6%	13.2	82.1
RBC_Daylight_Te	35%	14%	49%	2%	3%	6%	13.2	82.1
RBC_Rad300	36%	16%	48%	0%	3%	4%	6.4	84.6
RBC_Rad500	35%	15%	47%	3%	3%	4%	6.6	82.9
MPC_T_PP	35%	14%	47%	4%	3%	5%	10.1	82.1
MPC_T+D_PP	35%	14%	50%	0%	3%	5%	9.4	82.1
MPC_T+D_exp	<b>35%</b>	<b>15%</b>	<b>44%</b>	<b>7%</b>	<b>4%</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>89.6</b>



**Figura 63 Confronto tra MPC termico + daylight sperimentale e i 2 MPC simulativi con predizione perfetta, dataset novembre**

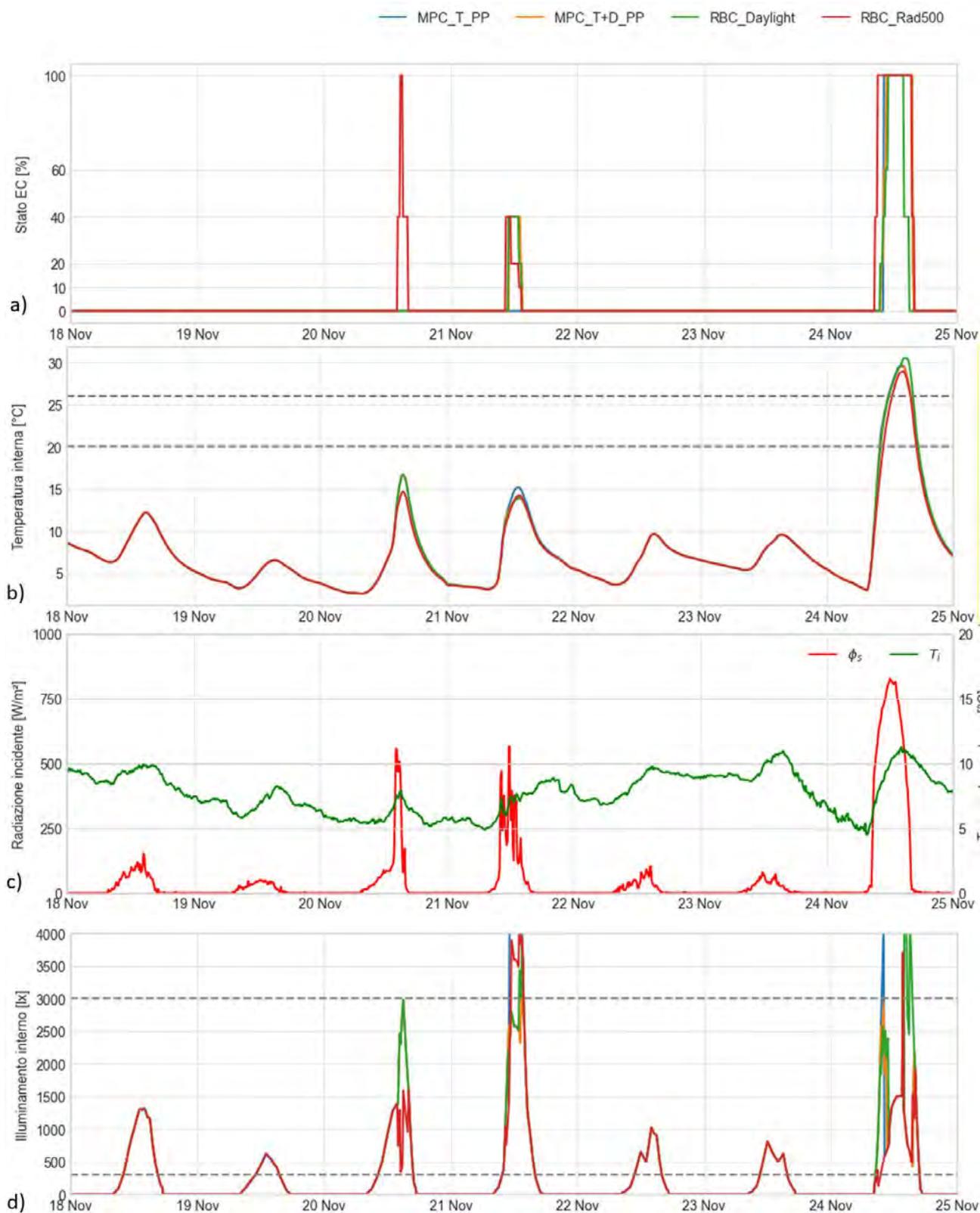
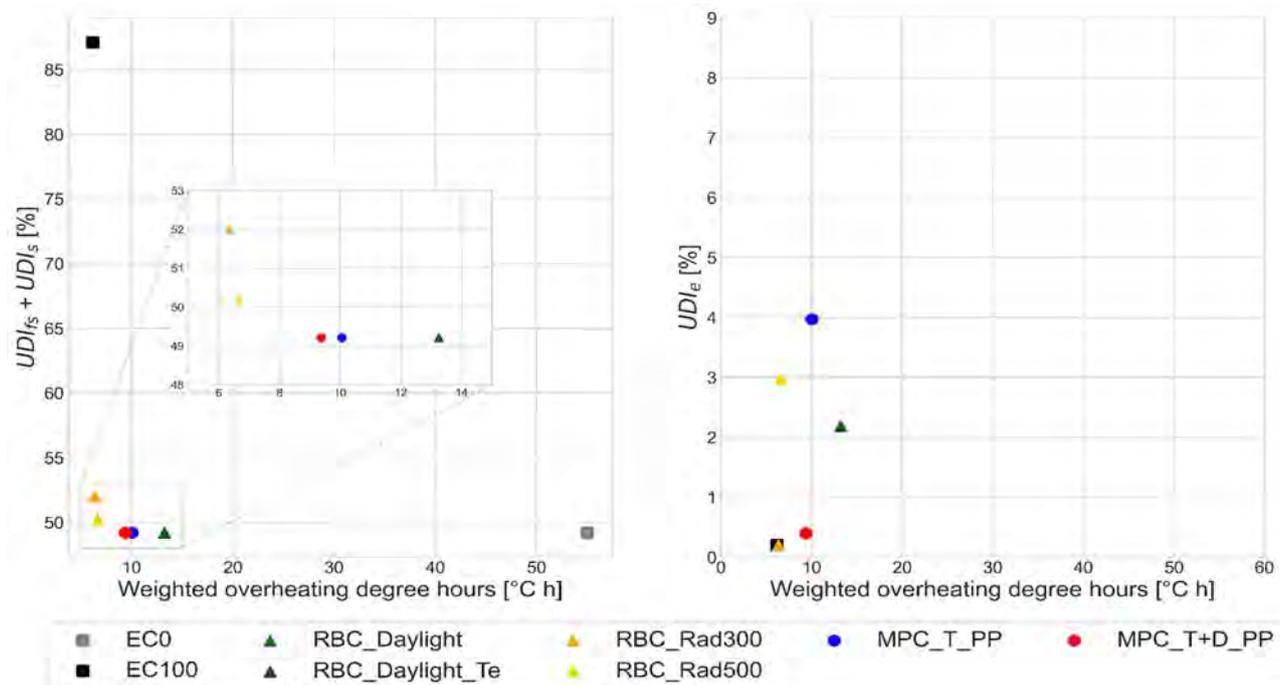


Figura 64 Confronto simulativo delle strategie di controllo, database novembre



**Figura 65 Confronto KPIs dataset novembre: andamento degli indicatori in funzione dei gradi ora di surriscaldamento e somma degli UDI fell-short e supplementary (a sinistra), gradi ora di surriscaldamento e UDI exceeded (a destra)**

### 6.11.3 Dataset Dicembre

Le Figure 66 e 67, a differenza delle precedenti, mostrano (dall'alto verso il basso):

- lo stato dei vetri elettrocromici deciso dall'algoritmo decisionale (per diversi casi, in nero tratteggiato quello implementato in campo, Figura 66);
- l'andamento della temperatura interna (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo, Figura 66);
- le disturbanti meteo del sistema (la temperatura esterna, in verde e la radiazione solare incidente sulla facciata, in rosso);
- l'andamento dell'illuminamento interno orizzontale sul piano di lavoro (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo, Figura 66);
- l'andamento della potenza di riscaldamento necessaria per controllare la cella alla temperatura mostrata nel grafico b. di cui sopra (per diversi casi, in nero tratteggiato quello misurato in campo, Figura 66).

Nella Figura 66 sono confrontati i dati relativi a 3 strategie di MPC con solo l'obiettivo di ridurre il discomfort termico (MPC\_T) sperimentali (MPC\_T\_exp) con le strategie MPC simulate con previsione reale (MPC\_T\_PR) e con perfetta conoscenza delle disturbanti (MPC\_T\_PP). In alternativa nella Figura 67 sono confrontati i soli risultati delle simulazioni, confrontando MPC con obiettivi diversi ma entrambe con conoscenza perfetta delle disturbanti climatiche (MPC\_T\_PP e MPC\_T+D\_PP) con l'output di alcuni RBC di riferimento (RBC\_Daylight e RBC\_500).

Viste le previsioni meteo del periodo di implementazione del MPC e visti i risultati poco soddisfacenti della campagna di novembre, è stato deciso di utilizzare il riscaldatore elettrico allo scopo di garantire durante le ore di occupazione la temperatura di set-point di 20°C e impostare il set-back a 12°C durante le rimanenti ore. Dunque, il riscaldatore garantisce in cella la temperatura di 20°C mentre l'MPC daylight controlla la radiazione solare trasmessa dalla facciata in modo da garantire la temperatura interna massima di 26°C. C'è

da dire che per l'implementazione dell'MPC sono stati utilizzati gli stessi modelli e la stessa formulazione della funzione obiettivo dei casi precedenti, per cui il controllore attuerà la scelta non considerando la presenza del riscaldatore nella TWINS. Questo come si vedrà non va ad inficiare la prestazione del controllo e convalida, inoltre, le ipotesi di lavoro degli altri due dataset; infatti durante l'implementazione dei due controlli in free running la funzione obiettivo ha minimizzato la differenza di temperatura del range di comfort andando quindi a minimizzare l'energia che un ipotetico impianto ideale avrebbe richiesto per riportare la temperatura all'interno del range di comfort termico. Vetri elettrocromici e riscaldatore vengono controllati dunque in modo indipendente e in particolare il controllo dell'impianto è un effetto secondario rispetto alle decisioni del MPC, nel senso che il controllo MPC modula la radiazione solare in modo da massimizzare le ore di comfort termico (non considerando la presenza del riscaldatore) e il riscaldatore lavora in aggiunta al MPC qualora non sia garantito comfort termico mediante il solo controllo della radiazione solare.

Nei grafici di Figura 67 sono riportati i risultati dell'implementazione del MPC\_T+D (linea nera tratteggiata), comparati con i due MPC simulativi durante il periodo di dicembre. Tale dataset è abbastanza complesso dal punto di vista delle perturbanti del sistema, perché si alternano giorni con elevata presenza di radiazione solare e temperatura compresa tra i 5°C e 10°C, e giorni con scarsa radiazione e temperatura esterna intorno a 0°C. In queste condizioni, il controllo MPC implementato in campo è stato in grado di mantenere la temperatura dell'aria interno entro il limite dei 26°C, riducendo al minimo il rischio di abbagliamento dell'occupante. La differenza sostanziale con i due MPC simulativi sta nell'utilizzo delle perturbanti: l'implementazione della strategia in campo dipende fortemente dall'accuratezza delle previsioni delle perturbanti del sistema, invece i due MPC (in blu quello termico e in arancione MPC termico e daylight) utilizzano la previsione perfetta, elaborata in post-processing. In tutti i giorni del dataset, l'implementazione del controllo MPC ha evitato il fenomeno del surriscaldamento, grazie al controllo degli apporti solari attraverso la facciata adattiva. Confrontando i risultati sperimentali con quelli simulati risulta che il controllo in campo predilige gli stati intermedi chiari (EC20 e EC40) anche in presenza di elevata radiazione solare per garantire comfort termico all'interno della cella ma che si traduce in discomfort visivo: infatti durante le ore centrali dei giorni dal 11 al 15 dicembre è stato sfiorato molto frequentemente la soglia del comfort visivo. Questo è dovuto essenzialmente al fatto che il modello di previsione dell'illuminamento è un modello semplificato non calibrato; a questo si aggiunge poi l'incertezza dovuto alle previsioni meteo che dunque vanno a compromettere la performance complessiva del controllo. Analizzando invece le simulazioni della stessa funzione di costo, si nota che durante i giorni in esame il controllo sceglie lo stato di massima colorazione in modo da evitare fenomeni di abbagliamento pur garantendo lo stesso livello di comfort termico in ambiente. Nella Figura 67 viene inoltre riportato l'andamento della potenza elettrica richiesta dal riscaldatore per il controllo della temperatura interna misurata e simulata. Il valore simulato deriva da una semplificazione del sistema, infatti per modellare il controllo della temperatura è stato utilizzato nel modello di EnergyPlus un impianto ideale con potenza nominale di 1800 W ma tale sistema non è mai stato validato tramite dati sperimentali. C'è da dire però che sebbene le due curve non siano sovrapponibili, viene mantenuto lo stesso andamento temporale.

Confrontando le strategie di controllo a livello simulativo, risulta evidente che tutti i controlli tendono a scurire il vetro nelle ore centrali, con qualche differenza in termini di livello di colorazione e durata dello stato. Questo si traduce in piccole differenze dal punto di vista termico (sono tutte all'interno del range di comfort e non si verifica il fenomeno del surriscaldamento).

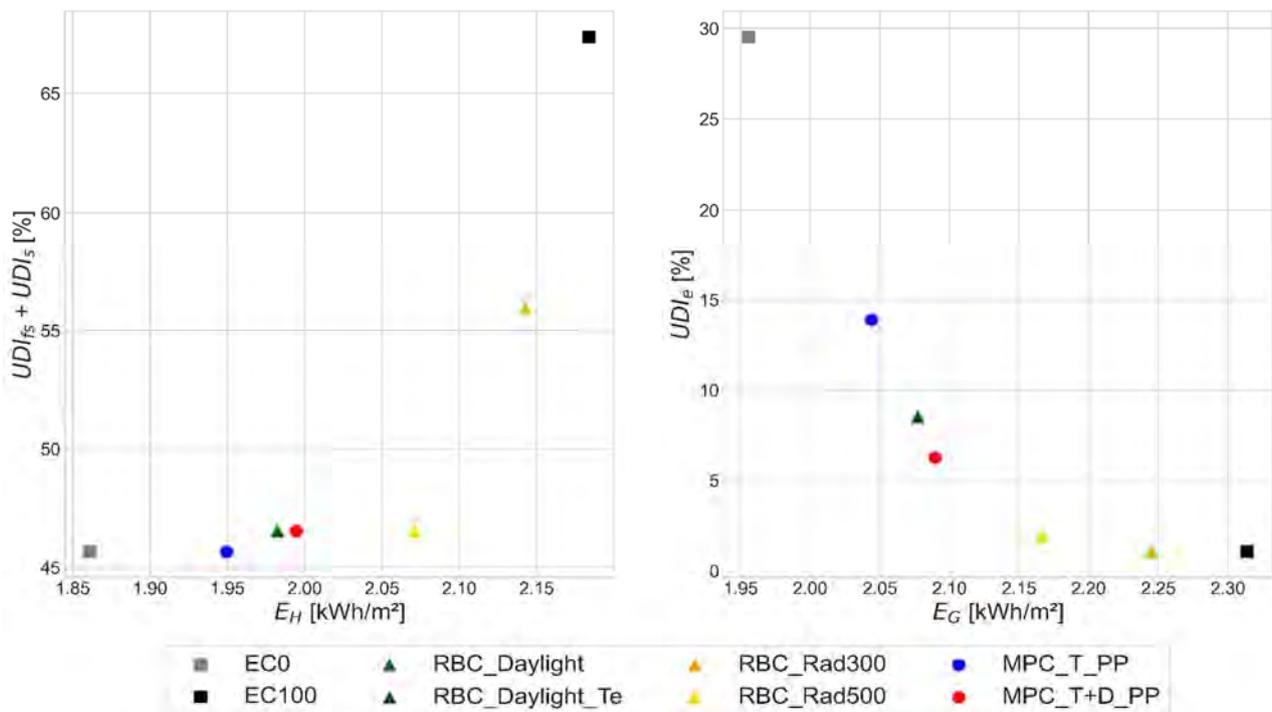
Infine, in Tabella 42 vengono riassunti gli indicatori di performance dei controlli; in questo caso sono riportati anche il fabbisogno elettrico e la potenza di picco del riscaldatore elettrico. Dalla tabella risulta evidente che tramite l'implementazione di tutti i controlli è stato evitato il fenomeno del surriscaldamento – verificato solo nel caso statico ECO – e ciò evidenzia il corretto funzionamento del controllo lato termico, seppure il controllore non sia a conoscenza della presenza dell'impianto di riscaldamento. Dal punto di vista del daylight, MPC\_T è il peggiore distaccandosi di 10 punti percentuali rispetto al MPC\_T+D e ai 2 RBC. Anche in questo dataset MPC\_T+D si dimostra tra i migliori sia dal punto di vista del daylight che del dominio termico:

infatti è il controllo che corrisponde al minor fabbisogno di energia da parte del riscaldatore, dimostrando dunque che è stato raggiunto l'equilibrio tra i 2 domini in esame.

A differenza degli altri due dataset, il grafico a dispersione di Figura 66 è stato modificato inserendo sull'asse delle ascisse il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento della cella (a sinistra) e il fabbisogno di energia primaria globale per la settimana in questione. Anche in questo caso dunque il controllo ottimale è quello che si avvicina all'origine degli assi.

**Tabella 42 Confronto KPIs strategie di controllo, database dicembre**

Strategia di controllo	UDI-fs [%]	UDI-s [%]	UDI-a [%]	UDI-e [%]	Comfort hours [%]	Weighted overheating degree hours [°C h]	EPH [kWh/m <sup>2</sup> ]	EPL [kWh/m <sup>2</sup> ]	EPG [kWh/m <sup>2</sup> ]
EC0	37%	9%	25%	30%	69%	73.7	1.861	0.095	1.956
EC100	50%	17%	32%	1%	92%	0	2.184	0.130	2.314
RBC_Daylight	37%	10%	45%	9%	82%	0	1.982	0.095	2.077
RBC_Daylight_Te	37%	10%	45%	9%	82%	0	1.982	0.095	2.077
RBC_Rad300	37%	19%	43%	1%	82%	0	2.142	0.103	2.245
RBC_Rad500	37%	9%	52%	2%	82%	0	2.071	0.095	2.166
MPC_T_PP	37%	9%	40%	14%	82%	0	1.950	0.095	2.044
MPC_T+D_PP	37%	10%	47%	6%	82%	0	1.995	0.095	2.090
MPC_exp	<b>37%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>	<b>28%</b>	<b>86%</b>	<b>0</b>	<b>3.177</b>	<b>0.096</b>	<b>3.273</b>



**Figura 66 Confronto KPIs dataset ottobre: andamento degli indicatori in funzione del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e somma degli UDI fell-short e supplementary (a sinistra), fabbisogno di energia primaria globale UDI exceeded (a destra)**

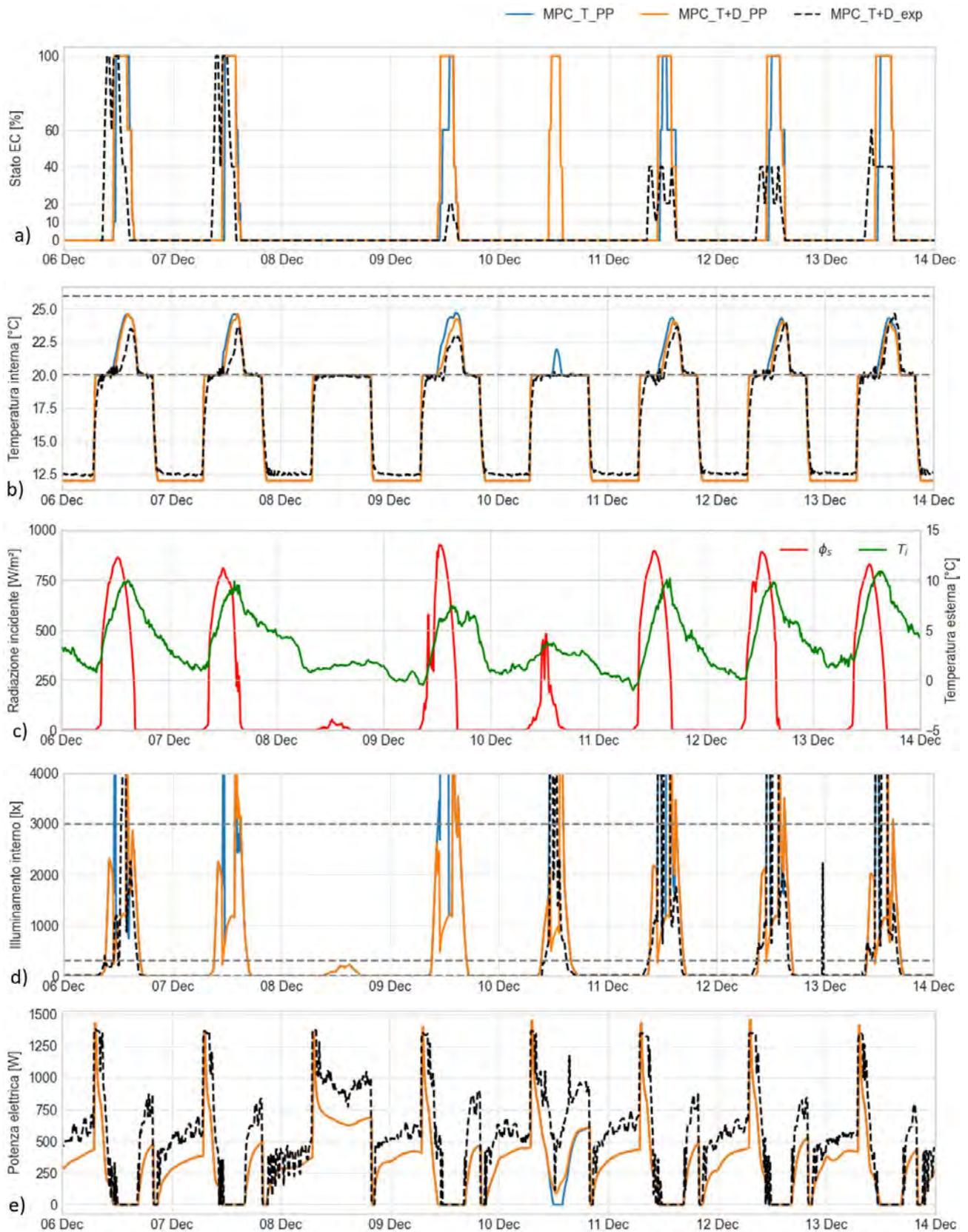


Figura 67 Confronto tra MPC termico + daylight sperimentale e i 2 MPC simulativi con predizione perfetta, dataset dicembre

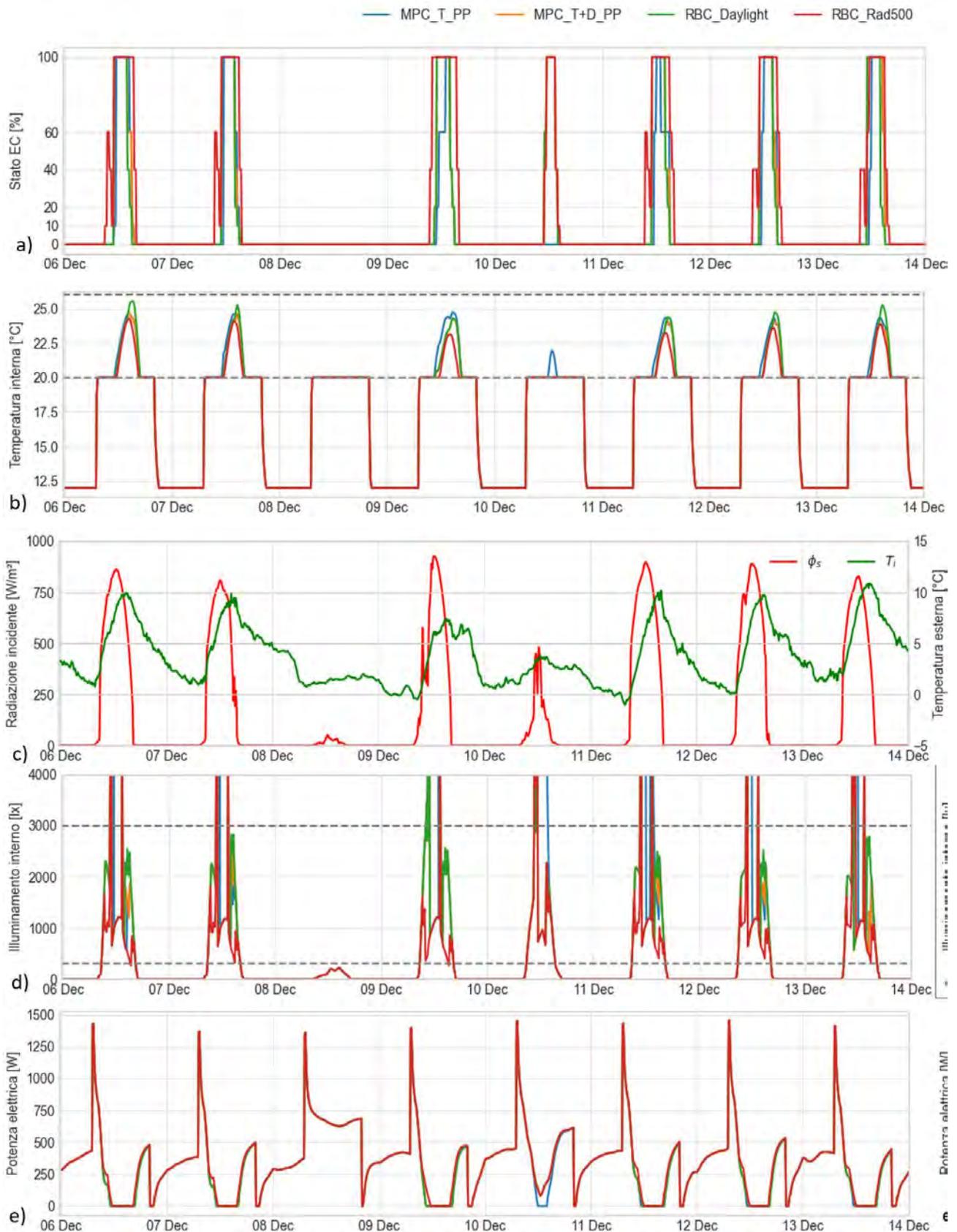


Figura 68 Confronto simulativo delle strategie di controllo, database dicembre

## 6.12 Conclusioni, requisiti e sfide dell'MPC per vetri dinamici

L'implementazione in campo di strategie di controllo avanzate del tipo model predictive control (obiettivo f.) per vetri dinamici nell'apparato sperimentale TWINS presso il Politecnico di Torino, ha permesso di raggiungere due risultati: uno relativo all'identificazione del controllo migliore per una determinata tecnologia, a seconda del contesto nel quale si usa, ed uno di processo.

Per quanto riguarda la prima scala di risultati, sono stati implementati controlli MPC su 3 periodi diversi (2 in mezza stagione ed uno in inverno), con diverse caratteristiche della funzione costo (mono- e multi-obiettivo), che ottimizzasse comfort termico o comfort termico e visivo contemporaneamente, in condizioni di free-running o di cella condizionata. L'analisi simulativa ha permesso di evidenziare come:

- il controllo MPC\_T risultasse sempre in un numero minore di ore con rischio di overheating (dallo 0 al 15% in meno rispetto al miglior controllo RBC), equivalenti ad avere sempre il vetro tutto scuro, ma con un minore costo energetico per l'illuminazione artificiale (dal 40 al 46% in meno);
- il controllo MPC\_T+D permette di ottimizzare sia le ore di overheating (uguali al miglior controllo RBC), che il comfort visivo (% di ore di UDI-a maggiore e di UDI-e minore) rispetto ad un controllo che ottimizza solo il comfort termico, equivalente (per quanto riguarda il livello di illuminamento orizzontale) ad un vetro sempre nello stato più chiaro (ma con una % di ore in comfort termico dall'80 al 90% maggiore), ed equivalente al migliore controllo RBC per quanto riguarda il daylight (sia come livello di illuminamento orizzontale interno, che di rischio di abbagliamento);
- In una condizione climatizzata durante la stagione invernale, l'MPC è in grado di ridurre il fabbisogno di energia totale della cella sperimentale dal 2 al 6% (nelle condizioni testate). L'introduzione di hard constraints per evitare il rischio di abbagliamento, se da una parte riduce al minimo il possibile abbagliamento, annulla i benefici energetici dell'MPC;
- In generale, dai grafici a dispersione, si è visto come l'MPC, dopo un fine-tuning dei pesi della funzione costo, è sempre in grado di ottimizzare più obiettivi contemporaneamente rispetto ad un RBC (i.e. comfort termico e visivo, fabbisogno energetico globale e comfort visivo, etc.);
- l'influenza della predizione risulta essere molto importante. Se si considera la predizione delle condizioni climatiche esterne, una conoscenza non perfetta delle condizioni climatiche per le successive 12 ore, ha determinato un aumento del rischio di surriscaldamento del 14% come percentuale di ore e del 27% come Gradi Ora di surriscaldamento, ed un aumento del rischio di abbagliamento (UDI-e) pari al 3% delle ore totali di test. Se consideriamo invece l'accuratezza della predizione delle variabili interne (i.e. temperatura interna), l'utilizzo di una RC che abbia una fitness inferiore al 70%, risulterebbe in un controllo completamente reattivo (e non predittivo). Quindi una predizione non accurata (sia delle forzanti esterne che delle variabili endogene), renderebbe nulli tutti i vantaggi dell'MPC, facendo risultare un controllo RBC più conveniente ed efficace.

Queste prime considerazioni quantitative sono relativamente poco generalizzabili, in quanto gli effetti del controllo e delle condizioni climatiche sulla test cell sperimentale, sono poco rappresentativi di un contesto edilizio reale (esposizione di tutte le pareti a temperatura esterna e radiazione solare, perdite di ventilazione per infiltrazioni alte, massa termica dell'involucro edilizio ridotta). Quindi i vantaggi riscontrati dell'MPC rispetto a controlli RBC ottimizzati, in queste analisi, rappresentano un minimo raggiungibile, perchè una inerzia termica maggiore, perdite per ventilazione ed esposizione minori, implicherebbero un impatto maggiore della capacità previsionale dell'MPC. Per questi motivi, l'infrastruttura sperimentale sarà oggetto di una ristrutturazione per risolvere la maggior parte di questi aspetti, quali riduzione dell'impatto delle condizioni climatiche esterne sull'ambiente interno (migliorando isolamento e riducendo le infiltrazioni di ventilazione) e aumentando il livello di monitoraggio, controllo ed automazione del sistema HVAC. Il processo utilizzato per implementare questi controlli MPC ha invece permesso di testare una serie di aspetti, nello specifico

- Individuare i parametri e le caratteristiche fondamentali di un modello ridotto termico mono-zona per il controllo predittivo di vetri dinamici;
- Sviluppare un processo di validazione ed identificazione del modello ridotto monozona, tale da ridurre i tempi e le risorse sperimentali per generare il dataset che permetta di identificare tali modelli ridotti data-driven;
- Sviluppare, implementare e testare un'infrastruttura sperimentale (di acquisizione di dati e controllo dell'ambiente interno), co-simulativa e di automazione, che possa supportare il test di controlli avanzati per elementi di involucro dinamici. Infatti da un confronto tra i risultati sperimentali e quelli simulativi per le stesse condizioni (tra le quali la stessa incertezza delle predizioni climatiche e della temperatura interna) visibile nella Tabella 40 (MPC\_T\_exp, MPC\_T\_PR e MPC\_T\_PP), si rileva un risultato sperimentale (MPC\_T\_exp) migliore del corrispettivo simulato (MPC\_T\_PR) per quanto riguarda il comfort termico, e di poco peggiore rispetto al rischio predetto di abbagliamento, ma più in generale indicano una sostanziale equivalenza dei risultati dei test sperimentali e quelli simulativi. La differenza rispetto al livello di comfort termico è dovuta alla leggera sovrastima della temperatura interna del modello RC, mentre per l'utilizzo di modello radiosity di daylight ha ridotto l'accuratezza dei risultati sul rischio di abbagliamento;
- Sviluppare un gemello digitale (digital twin, DT) del sistema sperimentale, con il massimo livello di maturità raggiungibile ed esprimibile in base ai seguenti requisiti, riassunti nella Figura 69 [120]:
  - (i) DT descrittiva: registra e permette di visualizzare dati in tempo reale (sezione 6.3.1 e 6.3.2, in particolare con la Dashboard visibile in Figura 51);
  - (ii) DT informativa: generando informazioni attraverso aggregazione e post-processing dei dati misurati (sezione 6.3.1 e 6.3.2, in particolare con la struttura di acquisizione e post-processing dei dati, Figura 48, e la Dashboard visibile in Figura 51);
  - (iii) DT predittiva: monitorando in tempo reale le grandezze del sistema e complementandole con informazioni da modelli predittivi (sezione 6.3.1 e 6.3.2, 6.6 e 6.7, in particolare con la struttura di acquisizione dati, Figura 48, e con il sistema di monitoraggio in Fig. 49);
  - (iv) DT prescrittiva: proponendo interventi da un'analisi dei dati, suggerendo azioni per il controllo degli attuatori in campo, ma anche fornendo avvisi (email) nel caso di interruzioni o problemi con gli esperimenti (i.e. attuatori non funzionanti secondo le attese, predizioni dei modelli troppo diverse dai dati misurati);
  - (v) DT trasformativa: prendendo azioni e attuando in maniera autonoma, attuando la strategia di controllo elaborata direttamente sugli attuatori sulla facciata e sui relativi sistemi di edificio interessati (HVAC, illuminazione artificiale).

Questo gemello digitale può rappresentare quindi una piattaforma che possa supportare il test, lo sviluppo ed il commissioning di controlli avanzati per elementi di involucro dinamici, di sensori e di sistemi di controllo, nonché di tecnologie dinamiche di involucro;

- Sviluppare una sensibilità maggiore tra la complessità del controllo, l'accuratezza dei modelli di predizione, l'implementabilità e l'integrazione di questi per tecnologie dinamiche di involucro edilizio.

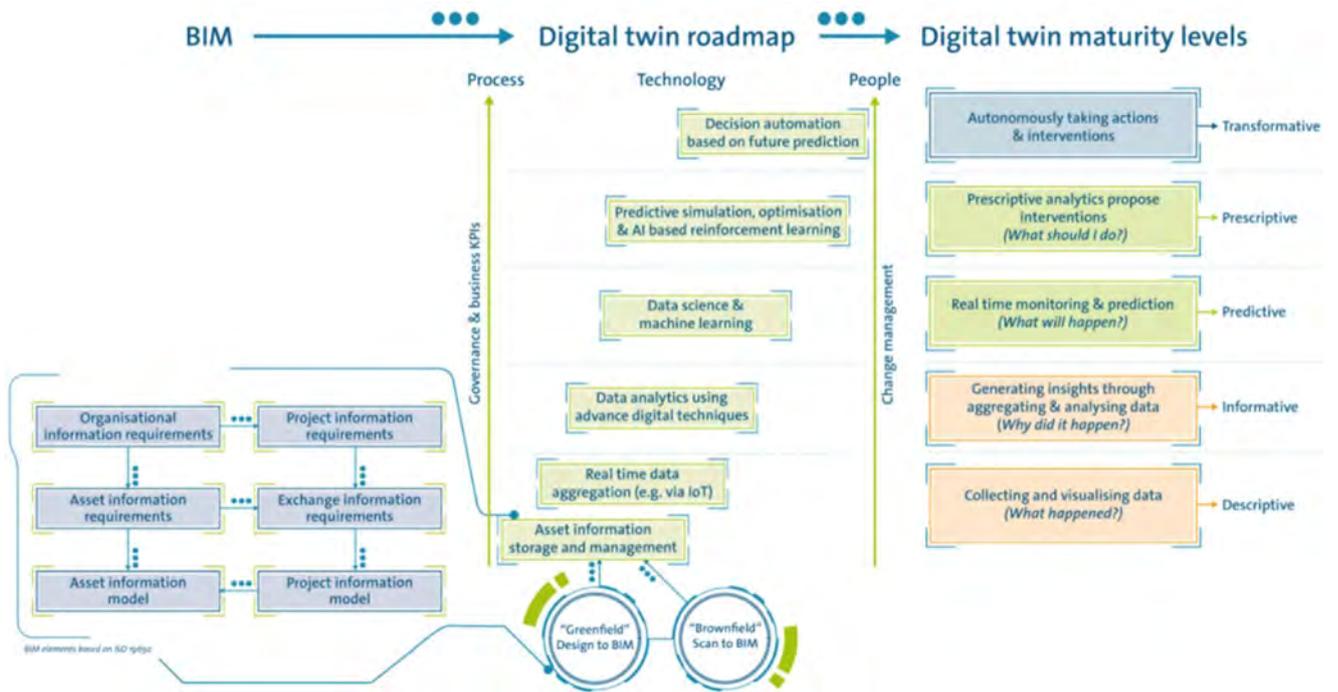


Figura 69. Livelli di maturità di una Digital Twin ed il suo ruolo in un processo BIM [120].

## 7 Conclusioni generali ed attività future

L'attività di ricerca svolta per il progetto PTR, durante il periodo 2020-2021, dal titolo "Controlli avanzati ed integrati di elementi di involucro trasparente dinamico per edifici intelligenti" 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, schermature solari in intercapedine e ventilazione naturale) 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, nonché i requisiti per l'implementazione in campo di suddette strategie.

Una prima analisi critica di letteratura, sulle tecniche di controllo più utilizzati per diverse tipologie di elementi di involucro trasparenti dinamici, nonché di architetture di sistemi di automazione per involucri edilizi, ha permesso di individuare i requisiti fondamentali per suddetti sistemi di controllo avanzati (anche basati su modelli predittivi) sia centralizzati che de-centralizzati, contribuendo anche alla scrittura dello standard internazionale ISO 52016-3 "Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 3: Calculation procedures regarding adaptive building envelope elements".

In seguito, l'attività di ricerca si è divisa in due fasi principali, relative ai due casi studio analizzati:

- a) Analisi numerica degli effetti di diverse strategie di controllo sulle prestazioni energetiche e di comfort visivo nonché sui carichi di picco del sistema edificio – impianto, per l'edificio F40 presso Enea Casaccia, oggetto di sperimentazione, in cui sono stati installati componenti finestrati per la ventilazione naturale ed il controllo solare con veneziane integrate in intercapedine. In particolare è stata valutata:
  - l'efficacia di diverse strategie di controllo RBC, a partire da benchmark di letteratura;
  - l'efficacia di strategie RBC adeguate al caso studio di interesse, elaborate da una ottimizzazione per step successivi, nell'ottica di una possibile implementazione in campo nell'edificio F40 (considerando quindi la disponibilità di automazione, sensori e dati sulle condizioni a contorno realmente presenti);
  - l'efficacia di logiche di controllo MBC (Model Based Control) che ottimizzassero contemporaneamente (ove possibile) le condizioni di comfort visivo e termico interno, la qualità dell'aria, il fabbisogno energetico ed i carichi di picco dell'impianto di climatizzazione;
  - la possibilità di migliorare logiche di controllo RBC, con informazioni di modelli ridotti nel campo del comfort visivo, nell'ottica di migliorare l'efficacia dei controlli implementabili in campo.
- b) Caratterizzazione sperimentale di un componente vetrato dinamico attivo, nello specifico un vetro elettrocromico (EC), integrato in una test cell esposta a condizioni climatiche reali e simulante un ambiente tipo, al fine di valutare i requisiti per l'implementazione in campo di strategie di controllo predittive in condizioni reali di esercizio. L'implementazione in campo ha permesso di:
  - valutare i parametri prestazionali di riferimento (trasmittanza termica, coeff. di trasmissione solare totale, trasmissione solare e luminosa) nei diversi stati di colorazione del vetro EC;
  - 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;
  - la calibrazione di più modelli numerici di simulazione (bianchi, grigi e su domini fisici complementari, i.e. termico e luminoso) che ha permesso una campagna parametrica di simulazioni numeriche;

- a. la formulazione e risoluzione di un problema di ottimizzazione del controllo dei vetri dinamici rispetto a diverse funzioni obiettivo, con caratteristiche predittive (MPC, Model Predictive Control);
- b. l'implementazione in campo della logica MPC, nonché il confronto simulativo con benchmark di logiche di controllo RBC (Rule Based Control).

La valutazione dell'impatto di controlli avanzati di sistemi di involucro dinamici sul caso studio F40 ha avuto il molteplice scopo di: (i) progettare metodi, architetture e algoritmi di controllo che ottimizzassero non solo il fabbisogno di energia primaria dell'edificio in questione, ma anche il comfort degli occupanti (da diversi punti di vista); (ii) rendere possibile l'implementazione di questi controlli avanzati, attraverso una adeguata rappresentazione della realtà dell'automazione nell'edificio stesso; (iii) valutarne i benefici ed i costi energetici ed in termici di carichi di picco, per supportare decisioni strategiche ed investimenti sul sistema edificio-impianto; non ultimo, elaborare una metodologia di co-simulazione (termo-energetica e di daylight) di applicabilità generale, che supportasse l'ottimizzazione di controlli avanzati (RBC e MBC) di componenti dinamici di involucro. Per supportare tali scopi, sono stati realizzati, calibrati e validati diversi modelli termo-energetici e di daylight, relativi ad alcune stanze dell'edificio F40, con un alto livello di automazione raggiungibile nell'involucro edilizio. In particolare l'effetto delle strategie di controllo sulle prestazioni dell'edificio F40, ed in particolare delle stanze oggetto dell'analisi, si quantifica nei seguenti aspetti:

- la strategia di controllo della ventilazione porta a una variazione massima tra tutti i livelli di automazione di 17.1 kWh/m<sup>2</sup>a sui fabbisogni energetici, da 100 a 940 W per quanto riguarda i carichi di picco di riscaldamento, dell'8% in termini di percentuale di periodo di occupazione in discomfort termico, e 100% in termini di percentuale di periodo di occupazione in discomfort per la qualità dell'aria interna;
- La strategia di controllo delle veneziane (visto l'orientamento Ovest) risulta in una variazione massima di 1.1 kWh/m<sup>2</sup>a sui fabbisogni energetici, non influenza il carico di picco invernale per ovvie ragioni, implica una variazione massima del 5.6% in termini di percentuale di periodo di occupazione in discomfort termico, del 7% in termini di periodi di occupazione con illuminamenti sul piano orizzontale superiore a 300 lux (UDI<sub>a</sub>), andando a eliminare completamente il rischio di abbagliamento (UDI<sub>e</sub> e DGP>0.40), che era comunque presente solo del 2% delle ore di occupazione (circa 90 ore l'anno).
- L'ottimizzazione delle strategie di controllo di entrambi i componenti dinamici, e l'implementazione in campo di un livello ottimizzato di automazione che considera solo controlli RBC, permetterebbe di raggiungere un fabbisogno energetico globale di circa il 4% inferiore rispetto a quello con un livello di automazione non ottimizzato, mantenendo una qualità dell'aria pari a quella attuale e con un discomfort termico e visivo (da abbagliamento e da quantità di luce naturale) nel limite accettabile del 5% per tutti gli ambiti (con un miglioramento del 4% per quanto riguarda l'abbagliamento, del 10% per la quantità di luce naturale, e del 5% per il comfort termico). Il raggiungimento del requisito di qualità dell'aria per almeno il 5% del tempo, con l'introduzione di sensori di CO<sub>2</sub> in ambiente, risulterebbe in un aumento massimo del 20% del fabbisogno energetico di riscaldamento, e del 40% dei carichi di progetto di riscaldamento, senza peggiorare il comfort termico degli occupanti.
- L'utilizzo di controlli MBC per predizioni di abbagliamento per questo particolare caso studio, visto l'orientamento Ovest, risulterebbe in un miglioramento marginale delle prestazioni evitando l'abbagliamento solo in un 1% in più del tempo rispetto ad un controllo cut-off (volto a evitare radiazione solare diretta in ambiente) e del 2% rispetto ad un modello basato sugli illuminamenti, mentre l'utilizzo di un modello predittivo degli illuminamenti interni orizzontali permetterebbe una riduzione del 5% del rischio di abbagliamento e del 10% del discomfort per insufficiente o eccessiva luce naturale rispetto ad una strategia basata sul cut-off angle (che si traduce in una differenza di circa 1.1 kWh/m<sup>2</sup>a di energia per illuminazione artificiale, 5-10% del fabbisogno di energia primaria

totale). Mentre nessuna differenza è rilevata per quanto riguarda il comfort termico (anche considerando la radiazione solare diretta sull'occupante) rispetto alla strategia cut-off, essendo questa già in grado di minimizzare il rischio di surriscaldamento dovuto a radiazione solare diretta.

- nell'ipotesi di presenza sia di impianto di riscaldamento che di raffrescamento nell'edificio F40, da una prima analisi esplorativa, su un numero ristretto di casi, di evince che l'ottimizzazione delle strategie di controllo della ventilazione naturale e della schermatura solare potrebbe permettere di ridurre il fabbisogno energetico fino al 30% accettando un livello di qualità dell'aria simile a quello attuale, mentre adottando un controllo basato anche sul livello di CO2 migliorando la qualità dell'aria, il fabbisogno energetico (di riscaldamento e raffrescamento) subirebbe un aumento di almeno il 34% (nell'ipotesi che l'automazione dell'involucro sia ottimizzata). Con la presenza dell'impianto di raffrescamento, ovviamente l'impatto delle strategie di controllo sul comfort termico è ridotto, ma solo del 2-3%, mentre restano le considerazioni precedenti per quanto riguarda il comfort visivo (rischio di abbagliamento e luce naturale).

L'utilizzo di modelli ridotti data-driven per supportare strategie di controllo model based è di particolare rilevanza. Per quanto riguarda il comfort visivo si può affermare che il modello semplificato per il calcolo degli illuminamenti orizzontali può essere utilizzato in assenza di veneziana o nel caso in cui le lamelle abbiano angolo di inclinazione maggiore o uguale a 30°, ma dipende fortemente su come si genera il dataset di training ed in particolare su come si dividono i dati per generare modelli di regressione differenti in casi in cui la radiazione solare è diffusa o diretta (considerando l'orientamento della finestra). L'utilizzo di questi modelli in un caso reale permette di calcolare con buona accuratezza i valori di illuminamento da variabili esterne facilmente misurabili, dunque può essere facilmente integrato per informare le scelte di un Building Management System. Tuttavia, l'applicazione di tali modelli richiede comunque uno sforzo modellistico precedente per estrapolare le funzioni di correlazione che verranno applicate in loco, dato che lo sviluppo dei modelli è strettamente legato alla posizione, all'esposizione e alla geometria di caso studio. Uno studio maggiormente esteso ed accurato relativo ai modelli di illuminamento potrebbe permettere il superamento di parte delle limitazioni riscontrate.

L'implementazione in campo di strategie di controllo avanzate del tipo model predictive control (obbiettivo f.) per vetri dinamici nell'apparato sperimentale TWINS presso il Politecnico di Torino, ha permesso di raggiungere due risultati, uno di merito sul tipo di controllo migliore per una determinata tecnologia, a seconda del contesto nel quale si usa, ed uno di processo, sullo sviluppo di una piattaforma sperimentale per il test di controlli per- e di tecnologie avanzate di involucro dinamico. Per quanto riguarda i risultati quantitativi, l'analisi sperimentale e simulativa ha permesso di evidenziare come:

- il controllo MPC permetta sempre di ottimizzare tutti gli obiettivi considerati nella funzione costo allo stesso tempo, a differenza di controlli RBC, che invece ottimizzano con più efficacia solo un obiettivo per volta;
- questo obiettivo è però raggiungibile con un importante sforzo modellistico, per avere delle predizioni del modello che rappresentino la realtà, infatti l'inaccuratezza delle predizioni dei modelli (sia climatici che degli ambienti considerati) potrebbe vanificare tutto i vantaggi dell'MPC, con una performance pari o inferiore a controlli RBC ottimizzati;
- i risultati prestazionali raggiunti (riduzione di fabbisogno totale di energia tra il 2 ed il 6 % quando la cella è climatizzata, riduzione del fabbisogno di illuminazione artificiale fino al 40-46% in meno rispetto ad un controllo RBC, riduzione dei gradi ora di overheating fino al 15%, con un livello di illuminamento orizzontale interno sempre tra i requisiti individuati) sono un livello minimo di prestazione raggiungibile per un MPC applicato al controllo della radiazione solare attraverso una tecnologia di involucro trasparente elettrocromica, considerando le caratteristiche del sistema sperimentale sul quale sono stati testati questi benefici (bassa inerzia, alte dispersioni per ventilazione e tutte le superfici esposte all'ambiente esterno).

Il processo utilizzato e l'infrastruttura sperimentale e co-simulativa messa a punto, ha permesso di realizzare un gemello digitale (digital twin, DT) del sistema sperimentale, con il massimo livello di maturità raggiungibile (DT descrittiva, informativa, predittiva, prescrittiva, automatizzata) che sia una piattaforma che possa supportare il test, lo sviluppo ed il commissioning di controlli avanzati per elementi di involucro dinamici, di sensori e di sistemi di controllo, nonché di tecnologie dinamiche di involucro.

In generale il vantaggio dell'integrazione di componenti dinamici vetrati di involucro controllati attivamente risiede nella capacità delle logiche di controllo di 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), a differenza di elementi di involucro statici, in cui questo trade-off è da raggiungere durante la progettazione, e non durante la fase di utilizzo dell'edificio, riducendo così la prestazione raggiungibile. La variabilità delle prestazioni in opera dei componenti dinamici di involucro ed il raggiungimento degli obiettivi attesi (riduzione fabbisogno energetico, massimizzazione del comfort interno) sono strettamente legate alle strategie di controllo utilizzate ed a come viene implementata l'automazione in edifici reali. La messa in campo di strategie di controllo non ottimizzate, potrebbe infatti pregiudicare il raggiungimento delle prestazioni attese, che potrebbero addirittura essere peggiori rispetto a quelle ottenibili con componenti trasparenti tradizionali statici, i.e. vetri camera con rivestimenti selettivi e ventilazione naturale non automatizzata. Per assicurare la corretta integrazione edilizia di tecnologie dinamiche trasparenti, risulta quindi fondamentale la 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 di questo PTR); 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 campo in tempo reale di elementi trasparenti di involucro; la possibilità e l'accuratezza nel replicare in suddetti modelli l'architettura di controllo del sistema reale (edificio o stanza), in modo da poter rendere estendibili i risultati, ed applicabili in controlli progettati; il corretto passaggio di informazioni riguardo i requisiti dell'implementazione in campo del controllo agli attori del processo costruttivo e del building management. Ulteriori attività future sarebbero auspicabili in relazione all'implementazione dei controlli realizzati (sia RBC che MBC) sull'edificio F40 di ENEA, parallelamente ad una più approfondita valutazione dell'impatto del controllo dell'involucro anche in condizione di presenza di impianto di raffrescamento estivo (rispetto all'analisi preliminare presentata nella sezione 4.5.2). Relativamente all'implementazione in campo di controlli MBC, ed in particolare per modelli di luce naturale, sarebbe utile elaborare una metodologia appropriata per migliorare l'accuratezza dei modelli ridotti presentati nella sezione 5 (soprattutto per quanto riguarda gli illuminamenti verticali ed il rischio di abbagliamento), parallelamente all'esplorazione dell'impatto dell'utilizzo di modelli fisici di luce naturale accurati in campo (multi-phase methods, implementabili su microcontrollori embedded, quali RaspberryPi). Dal punto di vista della tecnologia, lo sviluppo di tecnologie elettrocromiche si sta dirigendo sempre di più sulla modulazione dello spettro solare trasmesso in modo indipendente tra la parte visibile e quella infrarossa (tecnologie trasparenti plasmocromiche [121]). L'integrazione di queste tecnologie potrebbe aiutare a superare alcune limitazioni intrinseche dell'impatto delle tecnologie elettrocromiche (quali l'impatto sulla riduzione del fabbisogno di riscaldamento senza introdurre un possibile rischio di abbagliamento, oppure sulla riduzione del surriscaldamento estivo senza aumentare il fabbisogno di energia per l'illuminazione artificiale), ma per rendere ciò possibile si dovrebbero progettare, implementare e testare in campo strategie di controllo RBC ed MBC adeguate, che permettano un'integrazione ottimale di questo tipo di smart glazing negli edifici, attività che può ora essere possibile con l'infrastruttura sperimentale realizzata. A tal fine la facility TWINS, su cui è stata implementata tale infrastruttura sperimentale sarà oggetto di una ristrutturazione per ridurre l'impatto delle condizioni climatiche esterne sull'ambiente interno, migliorando la qualità del monitoraggio, del controllo e della automazione del sistema HVAC.

## 8 Riferimenti bibliografici

- [1] D. Saelens, J. Carmeliet e H. Hens, «Energy performance assessment of multiple-skin facades,» *HVAC&R Research*, vol. 9, n. 2, pp. 167-185, 2003.
- [2] L. Giovannini, M. Baracani, F. Favoino, A. Capozzoli, V. Serra, V. R. M. L. Verso e A. Pellegrino, «Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo. Report RdS/PAR2017/099,» ENEA, Rome, Italy, 2018.
- [3] B. P. Jelle, Hynd, A., A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey e R. Hart, «Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 96, pp. 1-28, 2012.
- [4] M. V. Nielsen, S. Svendsen e L. B. Jensen, «Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight,» *Solar Energy*, vol. 85, n. 5, pp. 757-768, 2011.
- [5] G. De Michele, R. Loonen, H. Saini, F. Favoino, S. Avesani, L. Papaiz e A. & Gasparella, «Opportunities and challenges for performance prediction of dynamic Complex Fenestration Systems (CFS),» *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 6, n. 3, pp. 101-115, 2018.
- [6] F. Favoino, Q. Jin e M. Overend, «Design and control optimisation of adaptive insulation systems for office buildings. Part 1: Adaptive technologies and simulation framework.,» *Energy*, vol. 127, pp. 301-309, 2017.
- [7] F. Favoino, R. C. G. M. Loonen, M. Michael, G. De Michele e S. & Avesani, «Advanced fenestration—technologies, performance and building integration,» in *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*, Woodhead Publishing, Elsevier, 2021.
- [8] R. C. G. M. Loonen, F. Favoino, J. L. Hensen e M. Overend, «Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades.,» *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 10, n. 2, pp. 205-223, 2017.
- [9] R. C. Loonen, F. Favoino, J. L. Hensen e M. Overend, «Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades,» *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 10, n. 2, pp. 205-223, 2017.
- [10] F. Favoino, F. Fiorito, A. Cannavale, G. Ranzi e M. Overend, «Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates,» *Applied Energy*, vol. 178, pp. 943-961, 2016.
- [11] M. Rabani, H. Bayera Madessa e N. Nord, «Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 44, 2021.
- [12] R. M. Barbosa, M. Bartak, J. L. M. Hensen e M. G. L. C. Loomans, «Ventilative cooling control strategies applied to passive house in order to avoid indoor overheating,» in *In Building Simulation 2015: 14th international conference of IBPSA*, Hyderabad, India, 2015.
- [13] M. Sorgato, A. Melo e R. Lamberts, «The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption,» *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 1-13, 2016.
- [14] B. Locher, A. Piquerez, M. Habermacher, M. Ragettli, M. Rösli, M. Brink, C. Cajochen, D. Vienneau, M. Foraster, U. Müller e J. M. Wunderli, «Differences between outdoor and indoor sound levels for

open, tilted, and closed windows,» *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, n. 1, p. 149, 2018.

- [15] L. A. A. Bunthof, F. P. M. Kreuwel, A. Kaldenhoven, S. Kin, W. H. M. Corbeek, G. J. Bauhuis e J. J. Schermer, «Impact of shading on a flat CPV system for façade integration,» *Solar Energy*, vol. 140, pp. 162-170, 2016.
- [16] F. Favoino, Q. Jin e M. Overend, «Design and control optimisation of adaptive insulation systems for office buildings. Part 1: Adaptive technologies and simulation framework.,» *Energy*, , vol. 127, pp. 301-309, 2017.
- [17] S. Ahmadi-Karvigh, B. Becerik-Gerber e L. Soibelman, «Intelligent adaptive automation: A framework for an activity-driven and user-centered building automation,» *Energy and Buildings*, vol. 188, pp. 184-199, 2019.
- [18] A. Luna-Navarro, R. Loonen, M. Juaristi, A. Monge-Barrio, S. Attia e M. Overend, «Occupant-Façade interaction: a review and classification scheme,» *Building and Environment*, vol. 177, pp. 1-13, 2020.
- [19] F. Favoino, M. Baracani, L. Giovannini, G. Gennaro e F. Goia, «Embedding intelligence to control adaptive building envelopes,» in *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*, Woodhead Publishing, Elsevier, 2021.
- [20] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann e M. Morari, «Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control,» *Energy and Buildings*, vol. 45, 2012.
- [21] S. H. Yoon, C. S. Park e G. Augenbroe, «On-line parameter estimation and optimal control strategy of a double-skin system,» *Building and Environment*, vol. 46, n. 5, pp. 1141-1150., 2011.
- [22] M. Mork, A. Xhonneux e D. Müller, «Hierarchical Model Predictive Control for complex building energy systems,» *Bauphysik*, vol. 42, n. 6, pp. 306-314, 2020.
- [23] F. Gugliemetti e F. Bisegna, «Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterrean climate,» *Building and Environment*, vol. 38, p. 479–492, 2003.
- [24] E. Lee e A. Tavil, «Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs,» *Building and Environment*, vol. 42, n. 6, 2007.
- [25] M. Zinzi, «Office worker preferences of electrochromic windows: a pilot study,» *Building and Environment*, vol. 41, n. 9, pp. 1262-1273, 2006.
- [26] A. Tzempelikos e H. Shen, «Comparative control strategies for roller shades with respect to daylighting and energy performance.,» *Building and Environment*, vol. 67, pp. 179-192, 2013.
- [27] P. Correia da Silva, V. Leal e M. Andersen, «Influence of shading control patterns on the energy assessment of office spaces,» *Energy and Buildings 50*, vol. 50, pp. 35-48, 2012.
- [28] M. Assimakopoulos, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris e G. Guarracino, «Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies.,» *Building and Environment*, vol. 42, n. 8, pp. 2829-2834, 2007.
- [29] K. V. D. Wymelenberg, «Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review.,» *Energy and Buildings*, vol. 51, p. 165–176., 2012.
- [30] S. Zhang e D. & Birru, « An open-loop venetian blind control to avoid direct sunlight and enhance daylight utilization,» *Solar Energy*, vol. 86, n. 3, pp. 860-866, 2012.

- [31] H. Gunay, W. O'Brien, I. Beausoleil-Morrison e S. Gilani, «Development and implementation of an adaptive lighting and blinds control algorithm,» *Building and Environment*, vol. 113, pp. 185-199, 2017.
- [32] A. Luna-Navarro, J. Blanco Cadena, F. Favoino, M. Donato, T. Polit, M. Perino e M. Overend, «Occupant-Centred Control strategies for Adaptive Facades: A preliminary study of the impact of shortwave solar radiation on thermal comfort,» in *Atti di Building Simulation 2019: 16a Conferenza di IBPSA*, Roma, Italia, Sett. 2019.
- [33] E. Shen, J. Hu e M. Patel, «Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies,» *Building and Environment*, vol. 78, pp. 155-170, 2014.
- [34] N. Kunwar, K. S. Cetin e U. Passe, «Dynamic shading in buildings: a review of testing methods and recent research findings,» *Current Sustainable Renewable Energy Reports*, vol. 5, n. 1, pp. 93-100., 2018.
- [35] E. Lee, D. DiBartolomeo e S. Selkowitz, «Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office,» *Energy and Buildings*, vol. 29, n. 1, pp. 47-63, 1998.
- [36] G. Yun, K. Yoon e K. Kim, «The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings panel,» *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 70-85, 2014.
- [37] K. J.H., P. J. K., Y. M. S. e K. W., «An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer,» *Building and Environment*, vol. 44, n. 7, pp. 1517-1527, 2009.
- [38] J. Wienold, F. Frontini, S. Herkel e S. Mende, «Climate based simulation of different shading device systems for comfort and energy demand,» in *Proceedings of building simulation 2011*, Sydney, AUS, 2011.
- [39] S. Olbina e J. Hu, «Daylighting and thermal performance of automated split-controlled blinds,» *Building and Environment*, vol. 56, p. 127-138, 2021.
- [40] E. Lee, E. Claybaugh e M. LaFrance, «End user impacts of automated electrochromic windows in a pilot retrofit application,» *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 267-284, 2012.
- [41] K. J.H., P. J. K., Y. M. S. e W. Kim, «An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer,» *Building and Environment*, vol. 44, n. 7, pp. 1517-1527, 2009.
- [42] F. Nicoletti, C. Carpino, M. Cucumo e N. Arcuri, «The Control of Venetian Blinds: A Solution for Reduction of Energy Consumption Preserving Visual Comfort,» *Energies*, vol. 13, n. 7, p. 1731, 2020.
- [43] A. Jonsson e A. Roos, «Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations,» *Solar Energy*, vol. 84, n. 1, pp. 1-9, 2010.
- [44] N. DeForest, A. Shehabia, S. Selkowitz e D. Milliron, «A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings,» *Applied Energy*, vol. 192, pp. 95-109, 2017.
- [45] J. Xiong e A. Tzempelikos, «Model-based shading and lighting controls considering visual comfort and energy use,» *Solar Energy*, vol. 134, p. 416-428, 2016.
- [46] Ž. Kristl, M. Košir, M. Trobec Lah e A. Krainer, «Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building,» *Renewable Energy*, vol. 33, n. 4, pp. 694-702, 2008.

- [47] J. Dussault e L. Gosselin, «Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort.,» *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 50-62, 2017.
- [48] S. Firlağ, M. Yazdanian, C. Curcija, C. Kohler, S. Vidanovic, R. Hart e S. Czarnecki, «Control algorithms for dynamic windows for residential buildings.,» *Energy and Buildings*, vol. 109, pp. 157-173, 2015.
- [49] B. Huchuk, H. Burak Gunay, W. O'Brien e C. Cruickshank, «Model-based predictive control of office window shades,» *Building Research & Information*, vol. 44, n. 4, pp. 445-455., 2016.
- [50] K. Le, R. Bourdais e H. Guéguen, «From hybrid model predictive control to logical control for shading system: A support vector machine approach.,» *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 352-359, 2014.
- [51] C. Gehbauer, D. H. Blum, T. Wang e E. S. Lee, «An assessment of the load modifying potential of model predictive controlled dynamic facades within the California context,» *Energy and Buildings*, vol. 210, 2020.
- [52] P. May-Ostendorp, G. Henze, C. Corbin, B. Rajagopalan e C. Felsmann, «Model-predictive control of mixed-mode buildings with rule extraction,» *Building and Environment*, vol. 46, n. 2, pp. 428-437, 2011.
- [53] M. S. Piscitelli, S. Brandi, G. Gennaro, A. Capozzoli, F. Favoino e V. Serra, «Advanced Control Strategies For The Modulation of Solar Radiation In Buildings: MPC-enhanced Rule-based Control,» in *Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Rome, 2019*.
- [54] T. Psomas, M. Fiorentini, G. Kokogiannakis e P. Heiselberg, «Ventilative cooling through automated window opening control systems to address thermal discomfort risk during the summer period: Framework, simulation and parametric analysis,» *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 18-30, 2017.
- [55] F. Stazi, E. Tomassoni e C. Di Perna, «Super-insulated wooden envelopes in Mediterranean climate: Summer overheating, thermal comfort optimization, environmental impact on an Italian case study,» *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 716-732, 2017.
- [56] X. Fu e D. Wu, «Comparison of the Efficiency of Building Hybrid Ventilation Systems with Different Thermal Comfort Model,» *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2820-2825, 2015.
- [57] J. Ren, X. Zhou, J. An, D. Yan, X. Shi, X. Jin e Z. S., «Comparative analysis of window operating behavior in three different open-plan offices in Nanjing,» *Energy and Built Environment*, vol. 2, pp. 175-187, 2021.
- [58] W. Jung, T. Hong, J. Oh, H. Kang e L. M., «Development of a prototype for multi-function smart window by integrating photovoltaic blinds and ventilation system,» *Building and Environment*, vol. 149, pp. 366-378, 2019.
- [59] J. S. Sykes, *Control of Naturally Ventilated Buildings: a Model Predictive Control Approach*, Doctoral dissertation, University of Sheffield., 2017.
- [60] S. S. Walker, W. Lombardi, S. Lesecq e S. Roshany-Yamchi, «Application of distributed model predictive approaches to temperature and CO2 concentration control in buildings,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, n. 1, pp. 2589-2594, 2017.
- [61] M. Fiorentini, G. Serale, G. Kokogiannakis, A. Capozzoli e P. Cooper, «Development and evaluation of a comfort-oriented control strategy for thermal management of mixed-mode ventilated buildings.,» *Energy and Buildings*, vol. 202, 2019.

- [62] G. Yun e K. Steemers, «Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer,» *Building and Environment*, vol. 43, pp. 1471-1482, 2008.
- [63] X. Dai, J. Liu e X. Zhang, «A review of studies applying machine learning models to predict occupancy and window-opening behaviours in smart buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 223, 2020.
- [64] J. K. Day, C. McIlvennie, C. Brackley, M. Tarantini, C. Piselli, J. Hahn e A. L. Pisello, «A review of select human-building interfaces and their relationship to human behavior, energy use and occupant comfort.,» *Building and Environment*, vol. 178, 2020.
- [65] S. Jain e V. Garg, «A review of open loop control strategies for shades, blinds and integrated lighting by use of real-time daylight prediction methods,» *Building and Environment*, vol. 135, p. 352–364, 2018.
- [66] W. Choi, J. Joe, Y. Kwak e J. H. Huh, «Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season.,» *Energy and Buildings*, vol. 49, p. 454–465., 2012.
- [67] M. Wigginton e J. Harris, *Intelligent Skins*, Gray Publishing, 2002.
- [68] C. S. Park, G. Augenbroe, N. Sadegh, M. Thitisawat e T. Messadi, «Real-time optimization of a double-skin facade based on lumped modeling and occupant preference,» *Building and Environment*, vol. 39, n. 8, pp. 939-948, 2004.
- [69] C. S. Park e G. Augenbroe, «Local vs. integrated control strategies for double-skin systems.,» *Automation in Construction*, vol. 30, pp. 50-56, 2013.
- [70] B. Seo, Y. B. Yoon, Mun, J. H. e S. Cho, «Application of Artificial Neural Network for the Optimum Control of HVAC Systems in Double-Skinned Office Buildings,» *Energies*, vol. 12, n. 24, 2019.
- [71] G. Gennaro, F. Goia, G. D. Michele, M. Perino e F. Favoino, «Embedded single-board controller for Double Skin Facade: a co-simulation virtual test bed,» in *Proceedings of International Conference of Building Performance Simulation Association BS2021*, Bruges, Belgium, 2021.
- [72] M. Arnesano, B. Bueno, A. Pracucci, S. Magnagni, O. Casadei e G. M. Revel, «Sensors and control solutions for Smart-IoT façade modules,» in *IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, Catania, Italy, 2019.
- [73] Y. Chen, Z. Tong, Y. Zheng, H. Samuelson e L. Norford, « Transfer learning with deep neural networks for model predictive control of HVAC and natural ventilation in smart buildings.,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, 2020.
- [74] M. Ayoub, «A review on machine learning algorithms to predict daylighting inside buildings,» *Solar Energy*, vol. 202, pp. 249-275, 2020.
- [75] J. Xiong, A. Tzempelikos, I. Bilonis e P. Karava, « A personalized daylighting control approach to dynamically optimize visual satisfaction and lighting energy use.,» *Energy and Buildings*, vol. 193, pp. 111-126, 2019.
- [76] «Ente Nazionale di Normazione (UNI),Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento (14683:2018, UNI EN ISO),» 2018.
- [77] «WINDOW,» Lawrence Berkeley National Laboratory, [Online]. Available: <https://windows.lbl.gov/software/window>. [Consultato il giorno 10 01 2022].
- [78] *D.P.R. 16-4-2013 n. 74.*, 2013.

- [79] (CEN), Comitato Europeo di Normazione, *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria... (EN 16798-1)*, Bruxelles, Belgio: Comitato Europeo di Normazione (CEN), 2019.
- [80] (UNI) Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *Finestre e porte - Permeabilità all'aria - Metodo di prova (UNI EN 1026:2016)*, Roma: (UNI) Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2016.
- [81] (UNI) Ente Nazionale di Normazione, *Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni, UNI EN 12464-1:2011*, 2011.
- [82] «EnergyPlus,» National Renewable Energy Laboratory, [Online]. Available: <https://energyplus.net/>. [Consultato il giorno 10 01 2022].
- [83] «Radiance,» Lawrence Berkeley National Laboratory, [Online]. Available: <https://www.radiance-online.org/>. [Consultato il giorno 10 01 2022].
- [84] «pyEP,» [Online]. Available: <https://pypi.org/project/pyEp/>. [Consultato il giorno 10 01 2022].
- [85] «Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB),» Lawrence Berkeley National Laboratory, [Online]. Available: <https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb/FrontPage>. [Consultato il giorno 10 01 2022].
- [86] E. Arens, T. Hoyt, X. Zhou, L. Huang e H. Zhang, «Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors,» *Building and Environment*, vol. 88, pp. 3-9, 2015.
- [87] A. Zani, H. Richardson, A. Tono, S. Schiavon e E. Arens, «A simulation-based design analysis for the assessment of indoor comfort under the effect of solar radiation,» in *Atti di SimAUD 2019: Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, Atlanta, USA, Apr. 2019.
- [88] E. Lee, D. Geisler-Moroder e G. Ward, «Modeling the direct sun component in buildings using matrix algebraic approaches: Methods and validation,» *Solar Energy*, vol. 160, pp. 380-395, 2018.
- [89] D. Bourgeois, C. Reinhart e G. Ward, «Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations,» *Building Research & Information*, vol. 36, n. 1, pp. 68-82, 2008.
- [90] J. Mardaljevic, M. Andersen, N. Roy e J. Christoffersen, «Daylighting metrics for residential buildings,» in *Atti della 27a sessione della CIE*, Sun City, Sudafrica, Lug. 2011.
- [91] J. Wienold e J. Christoffersen, «Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras,» *Energy and Buildings*, vol. 38, n. 7, pp. 743-757, 2006.
- [92] (CEN), Comitato Europeo di Normazione, *Luce diurna negli edifici (EN 17037)*, Bruxelles, Belgio: Comitato Europeo di Normazione (CEN), 2019.
- [93] C. E. d. N. (CEN), *Prestazioni energetiche degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 2: Interpretazione dei requisiti della norma EN 16798-1 - Parametri di input ambientale interno per la progettazione e la valutazione delle prestazioni... (CEN/TR 16798-2:2020)*, Bruxelles, Belgio: Comitato Europeo di Normazione (CEN), 2020.
- [94] D. Erbs, S. Klein e J. Duffie, «Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation,» *Solar Energy*, vol. 28, n. 4, pp. 293-302, 1982.
- [95] Y. Li e X. Li, «Natural ventilation potential of high-rise residential buildings in northern China using coupling thermal and airflow simulations,» *Building Simulation*, vol. 8, 2015.

- [96] ASHRAE Standards Committee, *ASHRAE Guideline 14- 2002 Measurement of Energy and Demand Savings*, ASHRAE Standards Committee, 2002.
- [97] M. Liu, B. K. Wittchen e P. K. Heiselberg, «Verification of a simplified method for intelligent glazed façade design under different control strategies in a full-scale façade test facility: Preliminary results of a south facing single zone experiment for a limited summer period,» *Building and Environment*, n. 82, pp. 400-407, 2014.
- [98] W. L. Scheuring e B. Scheuring, «An investigation of ventilation control strategies for louver windows in different climate zones, *International Journal of Ventilation*, 20:3-4, 226-235, DOI: 10.1080/14733315.2020.1777018,» *International Journal of Ventilation*, n. 20, pp. 226-235, 2021.
- [99] G. Van Moeseke, I. Bruyère e A. De Herde, «Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings,» *Building and Environment*, vol. 42, p. 784–793, 2007.
- [100] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky e R. Stewart, «Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance,» *Solar Energy*, vol. 44, n. 5, pp. 271-289., 1990.
- [101] Ente Nazionale di Normazione (UNI), *Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni (UNI EN 12464-1)*, Roma, Italia: Ente Nazionale di Normazione (UNI), 2021.
- [102] Y. Chan e A. Tzempelikos, «A hybrid ray-tracing and radiosity method for calculating radiation transport and illuminance distribution in spaces with venetian blinds,» *Solar Energy*, vol. 11, n. 86, p. 3109–3124, 2012.
- [103] F. Goia e V. Serra, «Analysis of a non-calorimetric method for assessment of in-situ thermal transmittance and solar factor of glazed systems,» *Solar Energy*, vol. 166, pp. 458-471, 2018.
- [104] F. Favoino, F. Goia, M. Perino e V. Serra, «Experimental analysis of the energy performance of an ACTIVE, RESponsive and Solar (ACTRESS) façade module,» *Solar Energy*, vol. 133, pp. 226-248, 2016.
- [105] OpenWeather, «One Call API,» [Online]. Available: <https://openweathermap.org/>.
- [106] Solcast, «Solar Forecasting Data,» [Online]. Available: <https://solcast.com>.
- [107] G. Gennaro, «Strategie di controllo avanzate di vetri elettrocromici per il risparmio energetico negli edifici; caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche,» *Tesi Magistrale, Politecnico di Torino*, 2019.
- [108] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini e A. Bemporad, «Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities,» *Energies*, vol. 11 (3), 2018.
- [109] J. Drgoña, A. Javier, F. Iago Cupeiro, B. David e e. al., «All You Need to Know about Model Predictive Control for Buildings.,» *Annual Reviews in Control 50*, pp. 190-232, October 2020.
- [110] P. Bacher e H. Madsen, «Identifying Suitable Models for the Heat Dynamics of,» *Energy and Buildings*, vol. 43, n. 7, pp. 1511-1522, 2011.
- [111] F. Isaia, «Exploiting the potential of adaptive building components by mean of innovative control strategies,» *PhD thesis, Politecnico di Torino*, 2020.
- [112] «Linear Grey-Box Models,» MathWorks, [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/ident/linear-grey-box-models.html>.

- [113] Winkelmann, F.C., «Daylighting Calculation in DOE-2,» *Lawrence Berkeley Laboratory report*, n. no. LBL-11353, 1983.
- [114] W. F.C. e S. Selkowitz, «Daylighting Simulation in the DOE-2 Building Energy Analysis Program,» *Energy and Buildings*, n. 8, pp. 271-286, 1985.
- [115] Commission Internationale d’Eclairage, *CIE Technical Committee 4.2, Standardization of the Luminance Distribution on Clear Skies*, Paris, France: CIE Pub. No. 22, 1973.
- [116] B. Geebelen e H. Neuckermans , «Optimizing Daylight Simulation for Speed and Accuracy,» in *Atti di Building Simulation 2003: 8a Conferenza di IBPSA*, Eindhoven, Paesi Bassi, Eindhoven, Netherlands.
- [117] A. Tsangrassoulis e V. Bourdakis, «Comparison of radiosity and ray-tracing techniques with a practical design procedure for the prediction of daylight levels in atria,» *Renewable Energy*, n. 28, p. 2157–2162, 2003.
- [118] F. Torrisi e A. Bemporad, «HYSDEL - A tool for generating computational hybrid models for analysis and synthesis problems.,» *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, pp. 235-249, 2004.
- [119] M. Herceg, M. Kvasnica, C. Jones e M. Morari, «Matlab Multi-Parametric Toolbox 3.0,» 2013. [Online].
- [120] R. HaskoningDHV, «buildingSMART.org,» [Online]. Available: <https://www.buildingsmart.org/take-bim-processes-to-the-next-level-with-digital-twins/>. [Consultato il giorno 28 January 2022].
- [121] A. Cots, S. Dicorato, L. Giovannini, F. Favoino e M. Manca, «Energy Efficient Smart Plasmochromic Windows: Properties, Manufacturing and Integration in Insulating Glazing,» *Nano Energy*, vol. 84, 2021.
- [122] Repubblica Italiana, «Decreto Interministeriale del 26 Giugno 2015, Applicazione delle Metodologie di Calcolo delle Prestazioni Energetiche e Definizione delle Prescrizioni e dei Requisiti Minimi Degli Edifici,» *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 162 (39), 2015.
- [123] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky e R. Stewart, «Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance,» *Solar Energy*, vol. 44, n. 5, pp. 271-289, 1990.
- [124] WINDOW, «<http://windows.lbl.gov/software/window,>» [Online].

## 9 Abbreviazioni ed acronimi

ABEs	Advanced Building Envelopes
CV-RMSE	Covariance of Root Mean Square Error
DSF	Double Skin Facades
EC	Electro-chromic
EA	Exhaust Air
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
IAC	Indoor Air Curtain
IAQ	Indoor Air Quality
KPI	Key Performance Parameters
MBE	Mean Bias Error
MBC	Model Based Control
MPC	Model Predictive Control
NMRSE	Normalised Root Mean Square Error
OAC	Outdoor Air Curtain
PCM	Phase Change Materials
P-RMSE	Proportional reduction (relative) Mean Squared Error
RBC	Rule Based Control
RC	Resistance - Capacitance
RES	Renewable Energy Sources
RMSE	Root Mean Square Error
SA	Supply Air
TB	Thermal Buffer
UDI-a	Useful Daylight Illuminance – autonomous
UDI-e	Useful Daylight Illuminance – excessive
UDI-fs	Useful Daylight Illuminance – fell short
UDI-s	Useful Daylight Illuminance – supplementary

## 10 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

### **Valentina Serra (Politecnico di Torino) – Responsabile scientifico**

Laurea in Architettura presso il Politecnico di Torino, Ph.D. in Fisica tecnica, è attualmente professore ordinario di Fisica tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino e vice-coordinatore del Collegio di Architettura. Svolge attività di ricerca presso il Dipartimento Energia, all'interno del Gruppo di Ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment), in cui coordina una specifica unità di ricerca sui temi dell'involucro edilizio avanzato, e svolge attività didattica in corsi di primo, secondo e terzo livello dell'area dell'Architettura.

Responsabile scientifico di numerosi contratti di ricerca con aziende private ed enti pubblici sui temi dell'involucro edilizio innovativo, con focus sulla valutazione della prestazione in termini di efficienza energetica e comfort ambientale attraverso modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale, ha partecipato e/o coordinato diversi progetti di ricerca su bandi competitivi, a livello nazionale e internazionale (quali PRIN, Horizon2020, Cost Action e Bandi POR FESR). E' co-Referente dei laboratori per la caratterizzazione termica di materiali, componenti e sistemi edilizi (TWINS-outdoor test cells, camera climatica e piastra calda) e membro della Commissione Ricerca del Dipartimento Energia.

E' attualmente membro del Collegio Docenti del Dottorato in Energia e sviluppo sostenibile (Ateneo proponente Università degli Studi di Perugia) ed è/è stata supervisor di 10 tesi di dottorato e valutatore esterno in 15 Commissioni nazionali e 5 commissioni internazionali. 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. Dal 2017 al 2020 è stata Presidente Commissione Cultura e membro della Giunta Esecutiva di AiCARR (Associazione italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento Refrigerazione) ed è attualmente membro del Consiglio Direttivo per il secondo mandato.

Revisore di articoli scientifici per diverse riviste internazionali di settore, è dal 2019 membro dell'Editorial Board della rivista Energy and Buildings, Elsevier. E' autrice di circa 200 pubblicazioni, di cui 85 indicizzate nella banca dati SCOPUS (h-index 21). Scopus Author ID: 7004067687, ORCID: 0000-0002-9689-9406.

### **Fabio Favoino (Politecnico di Torino)**

Fabio Favoino, è attualmente RTDB in Fisica Tecnica Ambientale 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, 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. A conclusione del suo dottorato dal 2016 al 2018 lavora come Senior Façade Engineer presso lo studio di Ingegneria Eckersley O'Callaghan, occupandosi della progettazione 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 presso il gruppo TEBE, al Politecnico di Torino, occupandosi di involucri ad alte prestazioni nell'ambiente costruito e non (trasporti, marino etc.), e come responsabile scientifico di diversi progetti di ricerca su questi temi su bandi e contratti industriali e competitivi, nazionali ed internazionali. Ha presentato la sua attività di ricerca in oltre 50 lavori, all'interno di conferenze internazionali e 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. Nella sua attività didattica

é 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. É' 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.

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

Luigi Giovannini attualmente ricopre il ruolo di assegnista di ricerca nell'ambito del programma di ricerca *Ambiente interno e energia degli edifici* presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino. Si Laurea in Architettura presso il Politecnico di Torino nel 2014, discutendo una tesi dal titolo *Design of an adaptive shading system for arid climates: theoretical, numerical and experimental analyses*, tesi svolta presso l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Nel 2017, durante il suo dottorato di ricerca, vince una borsa di studio Europea, nell'ambito della *COST Action TU1403 - Adaptive Façades Network* per svolgere di un periodo di ricerca presso l'Università di Cambridge e presso lo studio di ingegneria londinese Eckersley O'Callaghan. Nel 2019 consegue il dottorato di ricerca in Energetica presso il Politecnico di Torino, con una tesi intitolata *Design and operation of transparent adaptive façades from a visual comfort and energy use perspective*. I temi di ricerca di cui si occupa includono la simulazione ed il controllo di facciate dinamiche e di schermature complesse, ma anche la valutazione e l'ottimizzazione del comfort visivo dell'utente in relazione alla luce naturale. Collabora inoltre alla progettazione e realizzazione di un Living Lab per la valutazione di aspetti energetici e di comfort con utenti reali, da realizzare al Politecnico di Torino nell'ambito del progetto europeo iClimaBuilt. Il suo lavoro di ricerca è stato pubblicato su riviste internazionali e presentato a conferenze internazionali. È inoltre revisore per giornali quali *Building and Environment* e *Building Simulation*.

#### **Giovanni Gennaro (Politecnico di Torino)**

Giovanni Gennaro è attualmente dottorando in Energetica presso il Politecnico di Torino. Si è laureato in Ingegneria Energetica e Nucleare presso il Politecnico di Torino nel 2019 discutendo una tesi dal titolo *Strategie di controllo avanzate di vetri elettrocromici per il risparmio energetico negli edifici: caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche*, tesi risultata vincitrice del Premio Tesi AiCARR 2019. Nello stesso anno inizia il corso di dottorato in Energetica presso il Politecnico di Torino. Il progetto di ricerca, finanziato da Eurac Research, è focalizzato sullo sviluppo a livello simulativo di strategie di controllo avanzate di facciate dinamiche e sull'implementazione delle stesse su mock-up sperimentali. Il suo lavoro di ricerca ha l'obiettivo di ottimizzare il fabbisogno energetico e il comfort interno dell'utente mediante il controllo della ventilazione e della radiazione solare attraverso le facciate adattive. La sua attività di ricerca è stata presentata in conferenze internazionali ed è autore di articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali.

#### **Manuela Baracani (Politecnico di Torino)**

Laurea 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 2020 e 2021 svolge attività di ricerca presso il Politecnico di Torino nell'ambito di una Borsa di Ricerca dal titolo "Caratterizzazione sperimentale e numerica di facciate trasparenti dinamiche" e "Thermal modelling of high performance glazings". Nel 2021 entra nel corso di dottorato in Energetica presso il Politecnico di Torino, con un progetto di ricerca dal titolo "Occupant-centric and multi-domain design, operation and integration of advanced transparent envelopes in buildings".