POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Strategie di controllo avanzate di vetri elettrocromici per il risparmio energetico negli edifici: caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche

Relatori
Prof. Alfonso Capozzoli
Dr. Fabio Favoino
Ing. Francesco Isaia

Candidato
Giovanni Gennaro

Anno Accademico 2018/2019

"In theory, there is no difference between theory and practice,

while in practice there is "

[Benjamin Brewster]

Indice

Indice delle figure 6
Indice delle tabelle 8
1. Introduzione 10
1.1 Motivazioni 11
1.2 Obiettivi 11
1.3 Metodologia e struttura della tesi 12
2. Letteratura 15
2.1 Parametri per la caratterizzazione di una finestra 15
2.2 Fabbisogno energetico edificio 16
2.3 Smart window: stato dell'arte 17
2.3.1 Vetri termocromici 18
2.3.2 Finestre con rivestimento PCM 18
2.3.3 Vetri elettrocromici 19
2.3.4 Vetri a cristalli liquidi e SPD 20
2.3.5 Celle fotovoltacromiche PVCC 21
2.3.6 Valutazione delle prestazioni delle smart window 21
2.4 Strategie di controllo 22
2.4.1 Controlli rule based 22
2.4.2 Controlli Model Based 24
2.5 Software di simulazione energetica e co-simulazione 25
2.5.1 EnergyPlus 25
2.5.2 Energy Management Systems 25
2.5.3 BCVTB 26
2.6 Set-up sperimentale 27
2.6.1 Accorgimenti particolari 29
2.7 Caratterizzazione 31
2.8 Blower Door Test 32
2.9 Calibrazione 33
2.9.1 Validazione del modello 34
2.10 Identificazione del modello grey box 36

2.10.1 Identificazione della struttura del modello 37
2.10.2 Stima dei parametri 37
2.10.3 Validazione del modello 38
3. Caratterizzazione della cella 39
3.1 TWINS 39
3.1.1 Set-up sperimentale 39
3.1.2 Stima della conduttanza 41
3.2 Componenti trasparenti 43
3.2.1 Vetro statico 43
3.2.2 Vetri elettrocromici 44
3.3 Caratterizzazione Tsol 46
3.4 Blower door 50
3.4.1 Metodo A 51
3.4.2 Metodo B 53
3.4.3 Stima dei ricambi d'ora (ACH) 54
4. Modello simulativo e calibrazione sperimentale 55
4.1 Modello EnergyPlus 55
4.2 Calibrazione sperimentale 58
4.2.1 Schema sensori 58
4.3 Clear state 59
4.4 Tinted state 64
4.5 Parametri del modello validato 66
5. Riduzione del modello 68
5.1 Dati 68
5.2 Identificazione del modello 70
5.3 Stima dei parametri concentrati 76
5.4 Validazione del modello 79
6. Implementazione di controlli avanzati per i vetri elettrocromici 81
6.1 Controlli di riferimento 81
6.2 Controllo 1 81
6.3 Controllo 2 83
6.4 Controllo 3 87

6.5 Risultati e confronti 91
7. Conclusione e sviluppi futuri 94
8. Bibliografia 97
9. Allegati 101
Allegato I Codice Acquisizione Datataker per la Caratterizzazione 101
Allegato II Codice Acquisizione Datataker per la Calibrazione 103
Allegato III Codice per l'identificazione dei parametri concentrati tramite CTSM-R 105
Allegato IV Codice per l'implementazione del Controllo 1 (EMS) 108
Allegato V Codice per l'implementazione del Controllo 2RB (EMS) 109
Allegato VI Codice per l'implementazione del Controllo 2 MB 110
Allegato VIII Codice per l'implementazione del Controllo 3 (BCVTB) 114
Allegato IX Codice per l'implementazione del Controllo 3bis (BCVTB) 119

Indice delle figure

Figura 1 Struttura della toolchain 13
Figura 2 Diagramma schematico di una finestra perfetta [10] 17
Figura 3 Schema di un dispositivo elettrocromico [12] 19
Figura 4 Schema del funzionamento dei SPD e dei vetri a cristalli liquidi [14] 21
Figura 5 Confronto andamento del flusso specifico in funzione della differenza di temperatura tra doppio vetro statico e vetro con rivestimento PCM [17] 22
Figura 6 IDF editor EMS. Sensor (sinistra) Actuator (destra) 26
Figura 7 Curva di taratura della termocoppia TC1 27
Figura 8 Termoflussimetro (sinistra) e Piranometro esterno facciata Sud (destra) 28
Figura 9 Schermatura termocoppie superficiali esterne 29
Figura 10 Sensori e protezioni utilizzati per i vetri. A sinistra piranometro con lo schermo protettivo, a destra termoflussimetro e termocoppia superficiale interna ed esterna schermate all'esterno con nastro alluminato 29
Figura 11 Particolare del piranometro interno schermato 30
Figura 12 Confronti piranometri esterni 30
Figura 13 Particolare degli strumenti utilizzati per la Blower door: ventilatore con struttura forata (sinistra), manometri (destra) 32
Figura 14 Circuito RC del modello Ti a singolo stato [41] 37
Figura 15 Facciata Sud della TWINS 39
Figura 17 Schema sensori caratterizzazione opaco 40
Figura 16 Schema sensori per la misura dell'aria interna (sinistra) e caratterizzazione dei vetri (destra) 40
Figura 18 Andamento conduttanza parete Est 41
Figura 19 Andamento conduttanza pavimento 41
Figura 20 Interno cella. Vetri elettrocromici stato più chiaro (a sinistra) e stato più scuro (a destra) 42
Figura 21 Andamento spettrale Tsol del vetro statico 43
Figura 22 Stratigrafia HALIO [43] 44
Figura 23 Andamento del coefficiente di trasmissione T in funzione degli stati HALIO intermedi 45
Figura 24 Andamento spettrale Tsol 45
Figura 25 Andamento spettrale Tvis 46
Figura 26 Andamento della Tsol in funzione dell'angolo di incidenza, state 47
Figura 27 Caratterizzazione Tsol, clear state 48
Figura 28 Confronto Tsol sperimentale e simulata, tinted state 48
Figura 29 Caratterizzazione tinted state 49
Figura 30 Proprietà ottiche di HALIO5 49

Figura 31 Blower door test 50
Figura 32 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo A, test in pressione 52
Figura 33 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo A, test in depressione 52
Figura 34 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo B, test in pressione 53
Figura 35 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo B, test in depressione 54
Figura 36 Schema grafico 3D cella 55
Figura 37 Schema sensori calibrazione 58
Figura 38 Confronto della radiazione solare incidente facciata SUD 59
Figura 39 Confronto della radiazione solare trasmessa da EC1 59
Figura 40 Confronto temperatura media dell'aria interna tra i valori misurati e stimati dal modello BASE 60
Figura 41 Andamento temperatura superficiale esterna parete Est 61
Figura 42 Confronto temperatura interna 61
Figura 43 Confronto temperatura aria interna in funzione delle proprietà ottiche del plexiglass 62
Figura 44 Confronto temperatura in funzione del coefficiente di assorbimento solare delle pareti 62
Figura 45 Confronto temperatura superficiale interna del pavimento 63
Figura 46 Confronto temperatura aria interna del modello calibrato 64
Figura 47 Verifica file climatico tinted state. 65
Figura 48 Cofronto temperatura interna, tinted state 65
Figura 49 Schematizzazione dei parametri del modello validato 67
Figura 50 Schedule impianto e stato del vetro 70
Figura 51 Modello RC con resistenza di ventilazione 71
Figura 52 Modello RC finale 71
Figura 53 Dati input data frame STIMA 75
Figura 54 Confronto residuo, input e output, data frame TEST 79
Figura 55 Valori soglia Controllo 1 81
Figura 56 Carpet plot Controllo 1 82
Figura 57 Valori soglia Controllo 2 83
Figura 58 Flow chart BCVTB 83
Figura 59 Confronto della performance Controllo 2 85
Figura 60 Confronto dei carpet plot del Controllo 2 con i 2 metodi diversi 86
Figura 61 Carpet plot Controllo 3 88
Figura 62 Controllo 3bis in funzione della temperatura prevista dopo 30 minuti 89
Figura 63 Carpet plot Controllo 3bis 90
Figura 64 Confronto energia richiesta per il raffrescamento 91
Figura 65 Confronto dell'energia totale 92

Indice delle tabelle

Tabella 1 Coefficienti liminari interni ed esterni secondo la normativa UNI EN ISO 6946:2008 [34] 31
Tabella 2 Parametri per la validazione del modello, ASHRAE Guideline 14:2002 [38] 35
Tabella 3 Trasmittanza termica dei componenti opachi della cella 42
Tabella 4 Caratteristice vetro statico 43
Tabella 5 Proprietà ottiche dei layer elettrocromici 44
Tabella 6 Proprietà ottiche intero componente vetrato 44
Tabella 7 Coefficienti polinomiali EnergyPlus [25] 47
Tabella 8 Misure blower door Metodo A 51
Tabella 9 Elaborazione dati Blower door Metodo A 51
Tabella 10 Elaborazione dati Metodo B 53
Tabella 11 Valori derivati del Blower door test 54
Tabella 12 Stratigrafia muri perimetrali 56
Tabella 13 Stratigrafia pavimento 56
Tabella 14 Stratigrafia soffitto 56
Tabella 15 Proprietà termo-ottiche plexiglass-Modello BASE 57
Tabella 16 Parametri calibrazione Plexiglas 61
Tabella 17 Parametri per la caratterizzazione pavimento 63
Tabella 18 Parametri statistici validazione del modello Clear 64
Tabella 19 Parametri statistici validazione del modello tinted 64
Tabella 20 Stratigrafia dei muri perimetrali modello finale 66
Tabella 21 Stratigrafia del pavimento modello finale 66
Tabella 22 Stratigrafia soffitto modello finale 66
Tabella 23 Parametri componenti opachi modello finale 67
Tabella 24 Parametri plexiglass modello finale 67
Tabella 25 Identificazione data frame 68
Tabella 26 Stati dei vetri elettrocromici 69
Tabella 27 g-value dell'intero sistema vetrato 74
Tabella 28 Definizione del range per la stima dei parametri concentrati 78
Tabella 29 Report dei dati stimati da CTSM-R 78
Tabella 30 Matrice di correlazione dei parametri concentrati 78
Tabella 31 Validazione controllo 2MB 84
Tabella 32 Confronto performance dei controlli 91

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, il fenomeno del riscaldamento globale è diventato il tema centrale nel settore energetico e per limitare i potenziali danni causati da tale fenomeno, la politica energetica europea è volta a ridurre drasticamente le emissioni di CO_2 in atmosfera, incentivando dall'altro lato l'efficienza energetica sia nel settore edilizio che industriale.

In particolare, il settore edilizio è responsabile del 40% del consumo totale di energia dell'Unione Europea [1] ed essendo un settore in espansione è senza dubbio il settore più attenzionato dalle politiche energetiche europee, le quali prevedono riduzioni drastiche dei consumi energetici negli edifici sia nel breve che nel lungo termine. La direttiva 2010/31/EU è senza dubbio il punto di svolta per la progettazione degli edifici; è l'aggiornamento dell'Energy Performance of Building Directive EPBD 2002/91/EU e prevede che tutti gli edifici di nuova costruzione sia pubblici che privati devono essere edifici ad energia quasi zero (Nearly Zero Energy Buildings, NZEBs) entro il 31 dicembre 2020. Secondo l'EPBD [1] un edificio è definito ad energia quasi nulla se ha un'elevata prestazione energetica, con un basso fabbisogno energetico coperto da sorgenti energetiche rinnovabili. È chiaro dunque che la sfida per i prossimi anni sarà da un lato trovare delle soluzioni tecnologiche per l'efficientamento energetico e dall'altro incentivare lo sviluppo e l'utilizzo di risorse energetiche rinnovabili.

Tra tutti i componenti, i sistemi vetrati hanno un ruolo importante sul bilancio energetico degli edifici e si stima che siano responsabili del 40% del fabbisogno energetico degli edifici [1]. Una finestra ideale dal punto di vista dell'efficienza energetica è un sistema vetrato capace di cambiare le proprie caratteristiche in base alle differenti condizioni climatiche: ad esempio in inverno o nei climi rigidi la finestra deve massimizzare la quantità di apporti solari che entrano nell'ambiente interno, riducendo sia le dispersioni per trasmissione che l'abbagliamento per il comfort visivo; in estate o nei climi caldi invece la finestra ideale deve minimizzare la quantità di radiazione solare per evitare il surriscaldamento dall'ambiente interno e quindi l'aumento del fabbisogno di energia richiesto per il raffrescamento. È chiaro quindi che i componenti statici, benché energeticamente performanti, non sono in grado di rispondere a tali esigenze; una soluzione innovativa è senza dubbio l'utilizzo di tecnologie adattive intelligenti, in grado di cambiare le proprietà termiche e ottiche in modo attivo o passivo al fine di modulare la quantità di energia solare che entra in ambiente tramite i componenti stessi.

In particolare, i vetri dinamici attivi sono in grado di modificare le proprietà termo-ottiche in risposta ad uno stimolo esterno che può essere controllato direttamente dall'utente e/o dal sistema di Building Management Systems (BMS), in base a requisiti di performance dell'edificio (i.e. fabbisogno energetico, comfort termico, comfort visivo); tra queste tecnologie, quella più sviluppata e matura sul mercato è senza dubbio il vetro elettrocromico. I sistemi trasparenti elettrocromici sono in grado di modificare la colorazione del vetro in funzione di uno stimolo elettrico ricevuto; sono formati da una struttura multistrato di ossidi anodici e catodici (solitamente si utilizza la coppia ossido di tungsteno e ossido di nichel) in grado di cambiare le proprietà ottiche tramite reazioni di ossido-riduzione reversibile.

1.1Motivazioni

Recenti pubblicazioni [2] [3] [4] hanno evidenziato però che le performance energetiche di tali componenti innovativi è strettamente legata al controllo utilizzato, evidenziando come possano causare un aumento del fabbisogno energetico se controllati in modo non corretto. Ad esempio, in [4] è stato dimostrato che l'utilizzo di controlli basati sulla temperatura interna dell'aria in climi caldi comporta un aumento del fabbisogno energetico totale di un edificio dovuto essenzialmente ad un aumento dell'energia richiesta per l'illuminamento. Le strategie di controllo presenti maggiormente in letteratura adottano semplici regole di comando basate ad esempio sulla radiazione solare incidente, sull'occupazione dell'edificio, sulla temperatura dell'aria interna o esterna oppure su variazioni stagionali. Il controllo di questi sistemi innovativi non è banale perché molto spesso sono chiamati a rispondere a diversi requisiti di performance energetica che spesso sono in conflitto tra di loro (i.e. risparmio energetico e comfort visivo) e la scelta di un controllo può aumentare la performance di un target e contemporaneamente ridurre la performance dell'altro. Questa è una sfida importante per il mondo ricerca nell'ambito dello studio prestazionale delle facciate adattive focalizzate adesso sull'implementazione di controlli che vanno a ridurre il gap dovuto ai diversi target prestazionali.

1.2 Obiettivi

L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi è studiare delle strategie di controllo dei sistemi vetrati elettrocromici con lo scopo di minimizzare l'energia richiesta dall'edificio. Controllando lo stato del vetro, si modula la quantità di radiazione solare entrante attraverso i componenti vetrati e ciò senza dubbio porta a un miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio perché è possibile agire in modo attivo sul bilancio energetico dell'edifico, evitando ad esempio *l'over-heating* in estate o massimizzando gli apporti solari entranti in inverno.

In questa ottica, la tesi intende analizzare una metodologia per l'implementazione dei controlli, a partire dalle analisi sperimentali fino all'analisi dei controlli avanzati con lo scopo di raggiungere l'efficientamento energetico negli edifici.

Gli obiettivi della tesi sono dunque:

1. La creazione di un modello energetico calibrato;
2. La formulazione di un modello ridotto semplificato;
3. Implementazione e confronto delle strategie di controllo;

1.3 Metodologia e struttura della tesi

I controlli più avanzati delle facciate adattive necessitano infatti di un modello simulativo in grado di fare previsione sulle condizioni future del sistema esaminato; tale modello deve avere un'elevata velocità di calcolo e deve essere in grado di poter essere implementato su processori o microprocessori in modo da controllare in real-time e in modo automatico lo stato dei vetri elettrocromici. I modelli di tipo deterministico (o *white box*) non sono i candidati migliori a soddisfare tali caratteristiche perché hanno bisogno del maggior numero di informazioni possibili per descrivere a pieno il sistema fisico da caratterizzare; inoltre di norma questo tipo di modelli hanno tempi di elaborazione di qualche minuto (nel caso ad esempio di grandi edifici) e non possono essere implementati su microprocessori. Risulta evidente che è necessario l'utilizzo di modelli semplificati per l'implementazione di controlli avanzati real-time e senza dubbio una soluzione a tale problema è il modello *grey-box*, denominato anche ibrido, in grado di descrivere il comportamento di un sistema fisico attraverso l'analogia di un circuito elettrico con resistenze, capacitanze e sorgenti di corrente e tensione. È dunque un modello semplificato, che risolve le equazioni differenziali stocastiche in tempi brevi e non ha bisogno di un'elevata capacità di calcolo. Per tutti questi motivi, è stato scelto per l'implementazione dei controlli real-time dei vetri elettrocromici montati su una cella di prova sperimentale aventi.

È stata utilizzata la cella A delle TWINS (Testing Window Innovative System) situata sul tetto del laboratorio del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino [5]; ha le dimensioni di un modulo di facciata tipicamente utilizzato in edifici adibiti ad ufficio e la facciata Sud è l'unica ad essere vetrata, in cui è presente il sistema vetrato formato da un vetro statico e da 2 vetri elettrocromici. Le analisi sperimentali sono state svolte da dicembre 2018 ad aprile 2019, in collaborazione con la tesista Donatella Pepe [6].[6]

Per l'implementazione dei controlli è stata costruita la seguente *toolchain*, ovvero una sequenza a cascata di step sperimentali o simulativi in cui l'output di ogni step risulta essere l'input o lo stato di partenza di quello successivo:

1. Caratterizzazione dei componenti opachi e trasparenti della TWINS;
2. Calibrazione di un modello energetico simulativo della TWINS;
3. Creazione di un modello ridotto della cella di prova;
4. Implementazione ed analisi delle strategie di controllo avanzate.

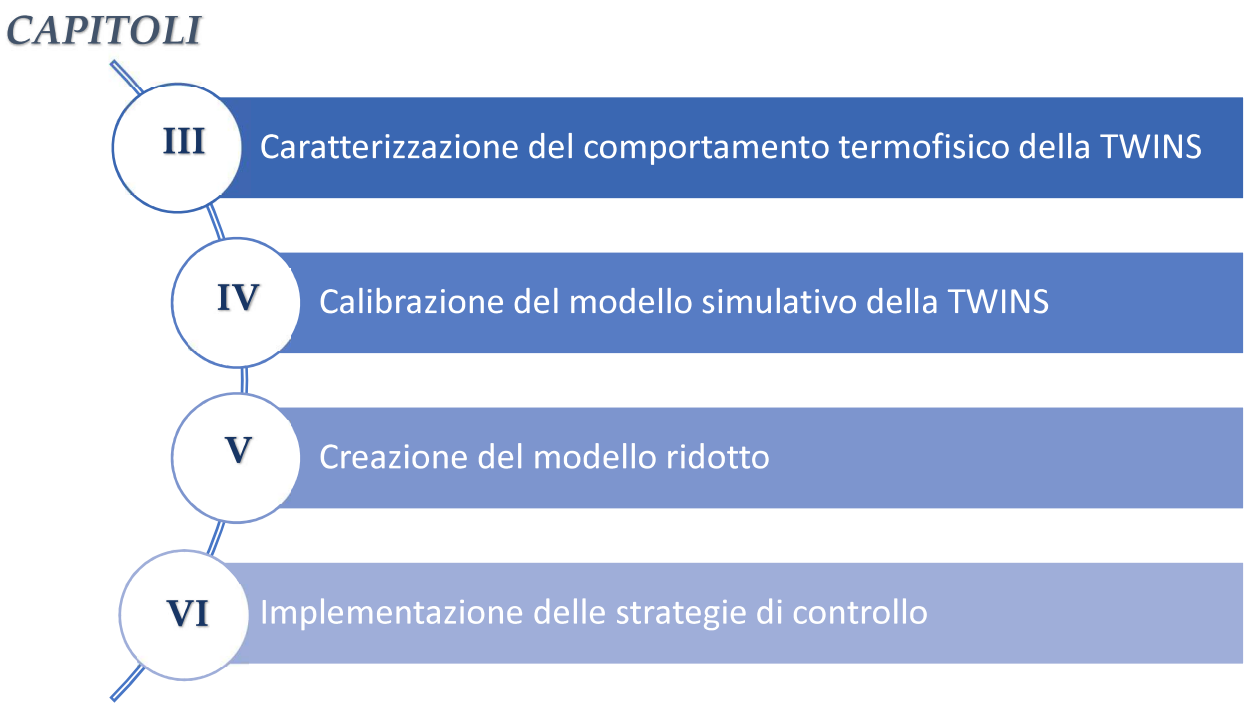

Figura 1 Struttura della toolchain

Nel Capitolo 2 è stata svolta un'analisi preliminare della letteratura, investigando le principali tecnologie adattive e i sistemi di controllo maggiormente utilizzati. È possibile trovare anche un'analisi delle procedure sperimentali per la caratterizzazione del comportamento termo-fisico dell'involucro e i parametri necessari per la validazione di un modello calibrato. Infine, viene riportato un metodo per la riduzione del modello e l'identificazione dei parametri concentrati.

Nel Capitolo 3 è descritto il processo di caratterizzazione sperimentale degli elementi di involucro della cella di prova, individuando quindi i valori di trasmittanza di tutti i componenti opachi, il valore dei ricambi d'aria dovuti alla ventilazione naturale ed infine la verifica delle proprietà ottiche del sistema vetrato. Tali valori vengono poi utilizzati per la creazione di un modello di simulazione energetica su EnergyPlus v 8.9; tale modello richiede infatti un'ingente mole di informazioni per caratterizzare il sistemo fisico da simulare, come ad esempio le caratteristiche geometriche della cella, le condizioni dell'ambiente circostante, le condizioni metereologiche o le caratteristiche dell'impianto di climatizzazione.

Nel Capitolo 4 vengono presentati i passaggi metodologici che hanno portato alla calibrazione del modello di EnergyPlus. La calibrazione è un processo iterativo basato su un approccio empirico definito per *tentativi ed errori*: si parte dalla simulazione del modello base della cella e si confrontano i risultati rispetto a quelli misurati sperimentalmente nelle stesse condizioni ambientali. Vengono stimati degli indici di calibrazione del modello, e se questi rientrano nei limiti allora il modello è validato, in caso contrario bisogna modificare alcuni parametri fino a quando non viene raggiunta la validazione del modello. Usualmente le grandezze utilizzate per il confronto sono la temperatura dell'aria interna oppure l'energia richiesta (firma energetica). Tramite il modello calibrato è quindi possibile ricavare tutte le informazioni necessarie in modo semplice, perdendo sicuramente l'accuratezza delle misurazioni sperimentali ma dall'altro lato

guadagnando tempo rispetto allo svolgimento di misure in campo che possono durare alcuni mesi.

Nel Capitolo 5 è stata svolta l'identificazione del modello ridotto a partire dati di output del modello calibrato. Per la stima dei parametri concentrati che costituiscono il modello RC, devono essere forniti i dati (simulati e/o misurati sperimentalmente) della cella in diverse condizioni al contorno: in particolare sono state prese in considerazione 3 settimane dell'anno (una invernale, una estiva e una primaverile) in modo da allenare il modello in diverse condizioni ambientali. Dopo un'analisi dettagliata dei possibili modelli presenti in letteratura, è stato scelto un modello a 2 stati in grado di predire la temperatura dell'aria interna in funzione di 3 parametri esogeni e uno endogeno quali la radiazione solare trasmessa attraverso il sistema vetrato, la radiazione solare globale, la temperatura dell'aria esterna e la potenza richiesta dall'impianto. I parametri sono stati stimati andando ad estremizzare le condizioni al contorno mediante l'utilizzo di *Schedule* randomiche che comportavano il cambio dello stato dei vetri elettrocromici e/o la modulazione della potenza erogata dall'impianto ogni ora.

Nel Capitolo 6 sono state implementate 5 strategie di controllo diverse con l'obiettivo di valutare l'efficientamento energetico mediante il controllo attivo della radiazione solare entrante in cella. Sono stati utilizzati sia controlli di tipo Rule Based che Model Based: i primi sono dei controlli basati su un set di regole in funzione di valori misurati di parametri esogeni per i quali non c'è bisogno di utilizzare un modello per la loro; per questa tesi è stato implementati un controllo Rule Based basati sulla radiazione incidente la facciata vetrata. È stato poi implementato un controllo sulla temperatura dell'aria interna (parametro endogeno) per verificare l'accuratezza del sistema di controllo basato sul modello ridotto, utilizzando come riferimento il modello deterministico di EnergyPlus. Verificata l'accuratezza del controllo basato sul modello ridotto, sono stati implementato quindi due controlli più avanzati Model Based (uno l'evoluzione dell'altro) che sfruttano le proprietà predittive del modello RC: ad ogni timestep il modello predice la temperatura al timestep successivo in funzione degli stati intermedi assunti dai vetri elettrocromici e sceglie lo stato che minimizza la differenza di temperatura tra l'aria interna e quella di *set-point*. Tale algoritmo di controllo è stato poi affinato, sfruttando a pieno le caratteristiche predittive del modello, andando a decidere il controllo anche in funzione del trend di temperatura dell'aria interna della cella previste dal modello ridotto. In questo modo infatti si tiene conto dell'inerzia termica del sistema, nel senso che il controllo non ha un effetto immediato sulla temperatura interna ma ci sarà un certo ritardo dovuto alla capacità termica dell'intero involucro.

2. Letteratura

In questo capitolo viene analizzato lo stato dell'arte dei vetri adattivi e dei loro controlli. Vengono inoltre descritte le procedure utilizzate durante le attività sperimentali e il metodo per l'identificazione del modello grey-box.

2.1 Parametri per la caratterizzazione di una finestra

Il Sole è senza dubbio la sorgente di energia principale del sistema Terra, è stato stimato infatti che alla distanza media tra Sole e Terra la potenza solare incidente sull'unità di superficie è pari a 1360 W/m^2 (costante solare) e di questa il 43% si trova nello spettro del visibile (tra 380 e 780 nm), il 52 % nello spettro dell'infrarosso (780-2500 nm) e il restante 5% nell'ultravioletto (300-380 nm) [7] .

La radiazione solare che colpisce un componente può essere assorbita, riflessa o trasmessa; queste tre componenti influenzano le performance energetiche dei componenti e per tale motivo sono stati definiti i seguenti indici adimensionali:

- Incide di trasmissione T: si riferisce alla percentuale di radiazione solare che viene trasmessa dal componente;
- Indice di riflessione R: si riferisce alla percentuale di radiazione solare che viene riflessa dal componente;
- Indice di assorbimento α: si riferisce alla percentuale di radiazione solare che viene assorbita dal componente;

La radiazione solare assorbita dal vetro viene trasformata in calore, causandone un aumento di temperatura; l'aumento di temperatura causa una successiva ri-emissione della radiazione solare per convezione ed irraggiamento. Per tenere conto di tale fenomeno, è stato introdotto il coefficiente di trasmissione solare totale g, definito secondo la [8] come il "*rapporto fra il flusso dovuto alla radiazione solare complessivamente entrante (dato dalla somma fra il flusso tramesso direttamente più quello assorbito e riemesso in ambiente per convezione ed irraggiamento) e la radiazione solare incidente*".

I parametri che caratterizzano le performance di un componente vetrato sono:

- La trasmittanza termica U [W/m^{2}K], definita come la quantità di potenza termica per unità di superficie trasmessa dal componente in presenza di una differenza di temperatura tra interno ed esterno. Viene espressa in W/m^{2}K;
- Il fattore solare g [-];
- Il coefficiente di trasmissione solare nel solare Tsol [-], definito come il rapporto tra la radiazione solare diretta e diffusa trasmessa dal componente e la radiazione solare incidente, considerando tutto lo spettro solare;
- Il coefficiente di trasmissione solare nel visibile Tvis [-], definito come il rapporto tra la radiazione solare diretta e diffusa trasmessa dal componente e la radiazione solare incidente, considerando solo lo spettro del visibile;

- L'indice di selettività Ke [-], definito come il rapporto tra il coefficiente di trasmissione solare nel visibile Tvis e il fattore solare g; questo parametro indica la capacità del vetro si trasmettere un selezionato range dello spettro del visibile. L'indice può assumere valori compresi tra 0 e 2.33, per valori minori di 0.6 indica che l'energia trasmessa è prevalentemente nel range dell'infrarosso, valori compresi tra 1 e 1.36 indicano che l'energia trasmessa è equamente distribuita tra il range del visibile e dell'infrarosso e valori superiori a 2 indicano che la radiazione trasmessa appartiene allo spettro del visibile. Il valore di 2.33 rappresenta la migliore tecnologia selettiva.
- L'emissività ε [-], definito come il rapporto tra l'energia irradiata dal vetro rispetto all'energia irradiata da un corpo nero alla stessa temperatura del vetro;

2.2 Fabbisogno energetico edificio

La UNI TS 11300-1 [9] definisce il fabbisogno di energia utile come "*la quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate per un dato periodo di tempo*". Per il calcolo del fabbisogno bisogna quindi applicare un bilancio energetico all'edificio, considerato come un sistema termodinamico aperto che scambia massa ed energia con l'ambiente circostante. Il bilancio energetico dipende dalla stagione di climatizzazione perché cambiano i versi dei flussi energetici (per convenzione sono considerati positivi i flussi entrante e negativi i flussi uscenti).

Fabbisogno energetico per riscaldamento

$$Q_{H,nd} = \left(Q_{H,tr} + Q_{H,ve}\right) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol})$$

Fabbisogno energetico per raffrescamento

$$Q_{C,nd} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot \left(Q_{H,tr} + Q_{H,ve}\right)$$

In cui

$Q_{H/C,tr}$ è la quantità di energia scambiata per trasmissione [J];

$Q_{H/C,ve}$ è la quantità di energia scambiata per ventilazione [J];

Q_{int} è la quantità di energia dovuta agli apporti interni [J];

Q_{sol} è la quantità di energia dovuta alla radiazione solare incidente sui componenti trasparenti [J];

$\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti di energia termica [-];

$\eta_{C,ls}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica [-];

È evidente dunque che per il riscaldamento l'apporto di radiazione solare comporta una diminuzione del fabbisogno energetico dell'edificio, viceversa durante il riscaldamento gli apporti solari aumentano il fabbisogno. In tal senso è stato definito il concetto di "finestra perfetta" [10] per la riduzione del fabbisogno energetico dell'edifico; in particolare la finestra

perfetta in estate o nei climi caldi deve essere totalmente trasparente alla luce visibile e totalmente riflettente nello spettro solare dell'infrarosso. Deve essere totalmente trasparente per la radiazione dell'infrarosso emesse dalle superfici interne dell'ambiente, ma totalmente riflettente per la radiazione infrarossa proveniente dall'esterno. In inverno o nei climi temperati invece la finestra perfetta deve essere totalmente trasparente per l'intero spettro solare e totalmente riflettente per la radiazione termica proveniente dall'interno (Figura 2)

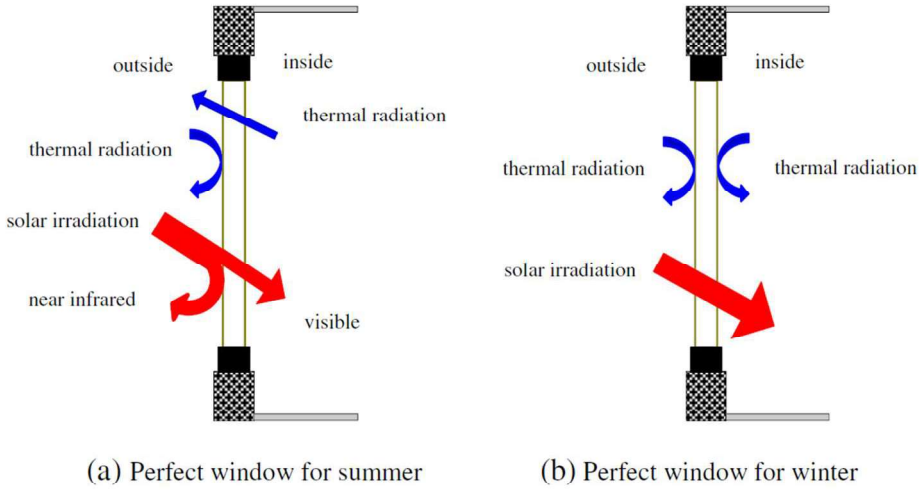

Figura 2 Diagramma schematico di una finestra perfetta [10]

È chiaro dunque che per il controllo della radiazione solare entrante in ambiente si necessita l'utilizzo di sistemi finestrati adattivi in grado di cambiare le proprietà termo-ottiche in funzione delle condizioni al contorno.

2.3 Smart window: stato dell'arte

Un sistema trasparente dinamico – viene anche definito intelligente, *switchable window*, *smart window*- è in grado di cambiare le proprietà termo-ottiche in modo attivo o passivo in modo da modulare la quantità di radiazione solare entrante in ambiente. A seconda del funzionamento sono distinti in:

- Tecnologie passive: il cambiamento delle proprietà avviene in funzione delle condizioni ambientali esterne (come ad esempio la temperatura superficiale o la radiazione solare) e quindi non possono essere controllate in alcun modo. Appartengono a tale gruppo i vetri termocromici, fotocromici e le finestre con rivestimento PCM;
- Tecnologie attive: il cambiamento delle proprietà avviene in funzione di uno stimolo esterno che cambia il potenziale elettrico del materiale cromogenico. Appartengono a tale categoria i vetri elettrocromici, i vetri a cristalli liquidi, i vetri SPD e i PVCC.

2.3.1 Vetri termocromici

È la tecnologia passiva maggiormente impiegata; utilizza un rivestimento formato da materiale termocromico in grado cioè di cambiare colore a seconda della temperatura e dunque la quantità di radiazione trasmessa. Ogni materiale termocromico è caratterizzato da una propria temperatura critica Tc, superata la quale inizia il processo di colorazione; quando il vetro supera la temperatura critica inizia quindi a scurirsi riducendo gli apporti di radiazione solare entranti in ambiente. Per quantificare le prestazioni energetiche di un vetro termocromico si utilizza l'efficienza di modulazione solare $\Delta Tsol$, definita come la differenza tra la radiazione solare trasmessa prima e dopo il cambiamento di colorazione. È un valore che varia da 0 a 1, e per un valore di performance accettabile, l'efficienza deve essere maggiore di 0.10. [11]

Il materiale più utilizzato come rivestimento termocromico è l'ossido di Vanadio VO_2, che presenta però un inconveniente tecnologico: ha una elevata temperatura critica (68°C) rispetto alla temperatura interna di un edificio; per tale motivo l'ossido di Vanadio viene dopato con Fluoro o Tungsteno per diminuire tale valore. [7]

Non potendoli controllare attivamente, accade molto spesso che la variazione delle proprietà ottiche del vetro avviene anche quando sarebbe opportuno non avvenisse, ad esempio in climi rigidi ma con un elevata radiazione solare: in questo caso i vetri si scuriscono perché aumenta la temperatura superficiale del materiale termocromico anche se la condizione ottimale sarebbe avere vetri nello stato più chiaro possibile per massimizzare la quantità di radiazione trasmessa.

2.3.2 Finestre con rivestimento PCM

Questo tipo di tecnologia presenta in intercapedine un materiale a cambiamento di fase (Phase Changig Materials). I PCM cambiano lo stato da solido a liquido assorbendo energia dall'ambiente e quando la temperatura si abbassa, il materiale ritorna nello stato solido rilasciando in ambiente la quantità di energia precedentemente immagazzinata. Per il rivestimento PCM vengono utilizzate le paraffine che però presentano una bassa conducibilità termica e un elevato cambiamento di volume durante le fasi di transizione, limitando così il loro utilizzo negli edifici. Inoltre, la paraffina ha un valore molto basso di trasmissione nel visibile, riducendo quindi le potenzialità di tale tecnologia. [11]

Recenti studi sulle performance energetiche di questa tecnologia su climi miti hanno dimostrato che l'utilizzo di finestra con rivestimento PCM hanno comportato una riduzione delle fluttuazioni della temperatura superficiale dei muri e dall'aria interna rispettivamente di 2.7°C e di 1.4°C e una riduzione del 57% dell'energia durante l'inverno. [7]

2.3.3 Vetri elettrocromici

I vetri elettrocromici sono la tecnologia attiva più matura presente sul mercato. Un dispositivo elettrocromico è costituito essenzialmente da 5 strati player posti tra 2 substrati di vetro o polimeri flessibili. I 5 strati dell'elettrocromico sono così divisi [12]:

1. Strato conduttore;
2. Strato di ossido elettrocromico catodico;
3. Strato elettrolita centrale;
4. Strato di ossido elettrocromico anodico;
5. Strato conduttore;

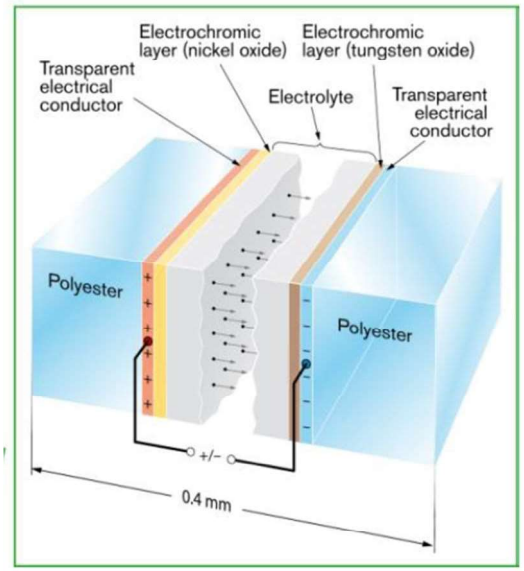

Figura 3 Schema di un dispositivo elettrocromico [12]

Un ossido elettrocromico è detto catodico quando cambia colorazione a causa dell'inserimento di uno o più elettroni, mentre sono detti anodici quando cambiano colore a causa dell'estrazioni di elettroni. I dispositivi più performanti sul mercato sono quelli che utilizzano l'ossido di tungsteno WO_3 come catodo e l'ossido di Nichel NiO come anodo. In particolare, l'ossido di Nichel assorbe principalmente nello spettro blu del visibile, mentre l'ossido di tungsteno nella regione rossa, risultando quindi un colore grigio neutro nelle condizioni più scure.

Lo strato conduttore è formato da ossidi trasparenti di conduzione (TCO), e il materiale con le prestazioni migliori sia dal punto di vista delle proprietà ottiche che elettriche è l'ossido di Indio-Stagno (ITO). Gli ioni devono essere piccoli per potersi muovere attraverso l'elettrolita centrale e per questo vengono utilizzati maggiormente protoni H+ o ioni Litio Li+ [13]

Il funzionamento di un dispositivo elettrocromico è molto simile a quello di una pila elettrica: se si applica una differenza di potenziale di alcuni volt in corrente continua (tipicamente tra 1-2 V) ai terminali degli strati conduttori, gli ioni si muovono dallo strato anodico a quello catodico passando attraverso l'elettrolita; raggiunto l'ossido di tungsteno avviene la reazione di ossidoriduzione che causa il cambiamento di colorazione del film. Applicando poi la reverse voltage il vetro riprende le proprietà ottiche di partenza. Il cambiamento di colore si traduce quindi in una variazione della quantità di radiazione solare trasmessa dal vetro.

Questi dispositivi hanno memoria a circuito aperto, ovvero cambiano lo stato del vetro solo quando si modifica la tensione imposta e mantengono lo stato del vetro scelto anche quando il circuito elettrico è aperto. Questo è sicuramente un vantaggio dal punto di vista delle prestazioni energetiche perché tale tecnologia richiede un consumo energetico solo al momento del cambio di stato.

Le modifiche delle proprietà ottiche avvengono in modo graduale con una velocità che dipende dalle dimensioni del dispositivo: un'area di pochi centimetri quadrati può scurirsi in pochi

secondi mentre i tempi di risposta possono essere anche di dieci minuti per una grande vetrata. C'è da dire però che è preferibile un tempo di risposta dell'ordine dei minuti in modo che l'occhio umano possa adattarsi gradualmente alla variazione della luminosità dell'ambiente riducendo quindi il possibile discomfort visivo.

I vetri elettrocromici di grandi dimensioni possono presentare "l'effetto iris" che si verifica quando il colore cambia in modo più rapido ai bordi rispetto al centro del dispositivo; questo effetto può creare dei discomfort sia termici che visivi e tale problema può essere risolto aumentando la differenza di potenziale imposta al dispositivo.

2.3.4 Vetri a cristalli liquidi e SPD

I vetri a cristalli liquidi e quelli SPD (Suspeded Particle Devices) hanno un funzionamento molto simile: sono formati da almeno due strati trasparenti conduttori (TCO) che racchiudono un materiale poroso che blocca il passaggio della luce [7]. In particolare, i vetri SPD sono formati da un fluido organico contenente particelle dipolare (*polyodidies*) caratterizzate da forte anisotropia ottica: applicando un voltaggio agli strati conduttivi le particelle si allineano lungo una direzione rendendo il vetro trasparente (Figura 4). La velocità di trasparenza dipende dal voltaggio applicato. Il valore del coefficiente di trasmissione nel visibile e nello spettro solare dipende sia dallo spessore del fluido organico che dalla densità di particelle in esso contenute e può variare da 1.5% (OFF state) fino al 55% (ON state). I vetri a cristalli liquidi invece sono formati da una matrice polimerica in cui sono dispersi in modo disordinato i cristalli liquidi, impedendo il passaggio della luce (a circuito aperto i vetri a cristalli liquidi assumono una colorazione tendente al bianco). Applicando una differenza di potenziale ai capi degli strati conduttori i cristalli iniziano ad allinearsi permettendo il passaggio della luce e quindi i vetri assumono lo stato di massima trasparenza [14].

A differenza dei vetri elettrocromici però, sia i vetri a cristalli liquidi che i vetri SPD hanno bisogno di un voltaggio continuo per mantenere le condizioni di massima trasparenza, causando quindi un aumento dei consumi elettrici (i.e. i vetri a cristalli liquidi consumo dai 10 ai 15 W/m^2); per questo sono utilizzati principalmente in posti in cui il vetro deve rimanere opaco per la maggior parte del tempo.

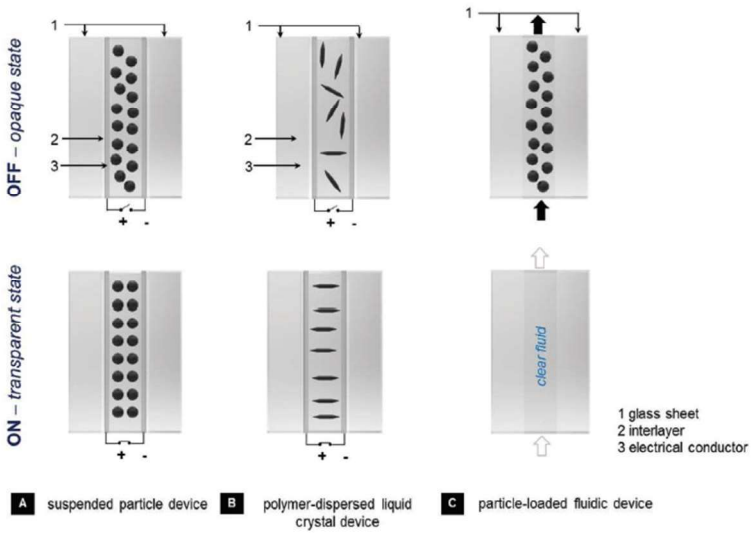

Figura 4 Schema del funzionamento dei SPD e dei vetri a cristalli liquidi [14]

2.3.5 Celle fotovoltacromiche PVCC

Le celle fotovoltacromici rappresentano la tecnologia più promettente tra tutti i dispositivi adattivi, perché sono in grado di modulare le proprietà ottiche senza l'utilizzo di energia esterna e contemporaneamente producono energia elettrica tramite la conversione fotovoltaica [2]. Tale tecnologia è abbastanza recente (2009) e integra le celle fotoelettrocromiche con le celle fotovoltaiche PV. Una cella fotoelettrocromica è costituita da due elettrodi separati da un elettrolita redox; l'anodo è generalmente costituito da ossido di titanio, il catodo invece da ossido di tungsteno. Le celle fotoelettrocromiche sono in grado di modificare la proprietà termo-ottiche del vetro e lo switch è dato dalle celle fotovoltaiche a cui sono collegate. La tecnologia però è ancora in fase di sperimentazione, nei primi prototipi realizzati non era possibile modulare il controllo solare da quello fotovoltaico con una efficienza di conversione attorno allo 0.5%. [15]

2.3.6 Valutazione delle prestazioni delle smart window

Una recente pubblicazione [16] ha evidenziato che le metriche standard utilizzate per descrivere la prestazione energetica di un vetro statico (U-value e g-value) non sono in grado di descrivere i comportamenti dinamici delle smart window perché il loro comportamento termo-fisico non può essere modellizzato con delle condizioni stazionarie. Ad esempio, Goia et al. [17] ha dimostrato che c'è una relazione strettamente non-lineare tra il flusso termico specifico e la differenza di temperatura nei vetri con rivestimento PMC, ricavando sperimentalmente un trend che ha una forma a S in funzione dello stato fisico del materiale PMC (Figura 5).

Inoltre, i vetri elettrocromici sono in grado di variare il range delle proprietà ottiche in pochi minuti quindi risulta difficile definire quali valori del range considerare per paragonare le performance di tale tecnologia innovativa, anche perché i valori sono strettamente correlatiti con la strategia di controllo implementata.

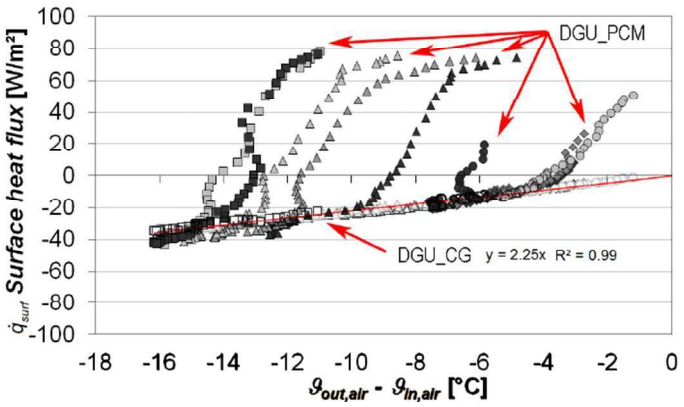

Figura 5 Confronto andamento del flusso specifico in funzione della differenza di temperatura tra doppio vetro statico e vetro con rivestimento PCM [17]

È necessario dunque creare una nuova metrica e definire dei parametri adatti a quantificare le performance energetiche del componente, considerando l'effetto che questo ha sulla performance dell'intero edificio sia in termini di risparmio energetico, oppure di comfort termico o visivo.

2.4 Strategie di controllo

La performance energetica dei sistemi vetrati adattivi è strettamente correlata alle strategie di controllo implementata. A tal proposito, gli enti di ricerca sono tutti indirizzati verso lo studio di strategie di controllo avanzate con lo scopo di ottenere degli algoritmi di controllo sempre più efficienti ed innovativi.

Le strategie di controllo più utilizzate per il controllo dei vetri dinamici sono di tipo Rule Base, ovvero sono definite da una serie di regole nella forma "*if condition, then action*" [18], basate sulla misura di alcuni parametri che influenzano l'edificio. La performance di questo tipo di controllo è strettamente correlata alle scelte delle regole e ai valori soglia imposti.

Dall'altro lato, sono presenti in letteratura dei sistemi di controlli più avanzati che non solo tengono conto dei valori misurati ma si basano anche sulle previsioni delle future evoluzioni del sistema. Questo tipo di modelli necessitano dunque di un modello simulativo con proprietà predittive per implementare delle logiche di controllo; per tale motivo sono definiti Model Based e hanno enormi potenzialità per migliorare la performance energetica dei componenti dinamici.

2.4.1 Controlli rule based

Le strategie di controllo Rule Based sono la pratica di controllo corrente per i vetri dinamici. I parametri di controllo maggiormente utilizzati sono la radiazione solare incidente, la temperatura esterna o interna dell'aria, la presenza degli occupanti o la condizione di daylight interno [2].

In particolare, Karlsson [19] ha confrontato le performance energetiche di due regole di controllo diverse: i due controlli sono stati implementati su un modulo di ufficio molto semplice, avente

una solo finestra sulla facciata esposta a Sud. Sono state scelte 3 diverse località (Miami, Denver, Stoccolma) per investigare le performance delle strategie su diversi climi e sono state utilizzate come tecnologie di riferimento vetri statici altamente performanti come i vetri basso-emissivi e sistemi di controllo solare. La prima strategia è basata sullo switch lineare tra i valori soglia di radiazione solare pari a 50-300 W/m^2, mentre l'altra è basata su un controllo definito "intelligente" basato sulla temperatura interna e sulla presenza degli occupanti; i risultati ottenuti mostrano che i vetri adattivi sono la migliore soluzione nei climi caldi (Miami) con una riduzione tra 50-150 kWh/m^{2}a a seconda della strategia di controllo implementata; la strategia "intelligente" sicuramente ha un maggior potenziale per il risparmio di energia rispetto al controllo basato sulla radiazione.

Jonsson et al. [20] hanno utilizzato 4 strategie di controllo nelle stesse località di Karlsson. Il controllo *Energy optimation* decide lo stato del vetro in base alla richiesta di cooling (stato scuro) o heating (stato chiaro); il controllo *Daylight optimization* invece è basato sul valore dell'irradianza diretta trasmessa dal vetro elettrocromico per controllare anche il comfort visivo (i raggi solari creano abbagliamento quando il sole è basso oppure quando la radiazione solare è perpendicolare alla finestra). Sono state create poi 2 strategie di controllo definite *Office 1* e *Office 2* in cui vengono definite diverse schedule per i 2 controlli sopra descritti in base all'occupazione. Sono state utilizzate poi come riferimento vetri basso emissivi e controllo solare. I risultati mostrano che i vetri elettrocromici hanno una performance energetica migliori in climi caldi (Miami) in cui il controllo *Office 2* ha ridotto il fabbisogno energetico di 200 kWh/m^{2}a; nei climi freddi (Stoccolma) la situazione è invertita e i risultati mostrano che si ottiene maggior risparmio energetico tramite l'utilizzo di vetri basso emissivi.

Questi due controlli confermano dunque che i vetri elettrocromici producono una maggiore riduzione del fabbisogno energetico nei climi caldi e in particolare riducono la quantità di energia richiesta per il cooling, perché riescono a modulare la quantità degli apporti solari trasmessi riducendo quindi la quantità dell'energia che deve essere sottratta dall'impianto. Se nel calcolo del fabbisogno di energia totale dell'edificio si considera anche la quantità di energia elettrica dovuta all'illuminazione, risulta però che l'utilizzo degli elettrocromici in condizione di massima colorazione non apporta una riduzione del fabbisogno. A tal proposito Ritter et al. [4] hanno implementato un controllo basato su valori soglia della temperatura interna, confrontandoli con quelli basati sul controllo della radiazione solare e sull'illuminazione naturale; i risultati mostrano come la strategia basata sul controllo della temperatura dell'aria interna comporta una riduzione del fabbisogno energetico soprattutto per il raffrescamento in climi caldi (è stata stimata una diminuzione del 60% a Dubai). Considerando però il consumo elettrico per l'illuminazione però è stato dimostrato che l'utilizzo di tale controllo nei climi caldi comporta un aumento dei consumi.

Sono presenti poi alcune pubblicazioni che tengono conto di più tipi di performance target; ad esempio Gugliermetti et al. [21] hanno confrontato la performance energetica e visiva di due strategie di controllo dello stato dei vetri elettrocromici: uno è basato su un controllo di tipo ON-OFF e l'altro basato su un controllo lineare in funzione della radiazione solare incidente. I

controlli sono stati implementati su 3 città italiane diverse (Bolzano, Roma, Catania) per studiare la potenzialità dei vetri elettrocromici nel clima Mediterraneo. I risultati ottenuti mostrano che per l'approccio energetico le due strategie di controllo richiedono la stessa quantità di energia primaria, mentre per l'approccio visivo in entrambi i controlli si ha un aumento minimo dell'energia primaria totale (pari al 10%) e il controllo migliore è senza dubbio quello basato sulla strategia lineare. L'aumento dell'energia primaria è però controbilanciato da un aumento del comfort visivo.

2.4.2 Controlli Model Based

I controlli Model Based hanno senza dubbio delle potenzialità per il miglioramento della performance energetica dei sistemi vetrati, seppur ancora oggi sono stati implementati solo a livello simulativo. Questo tipo di controllo ha bisogno di un modello attraverso cui basare l'algoritmo decisionale.

Ad esempio Assimakopoulos et al. [3] hanno implementato un sistema di controllo basato sulla fuzzy-logic implementata sui dati sperimentali di un periodo estivo ed uno invernale durante i quali gli utenti controllavano manualmente il vetro elettrocromico della stanza. Tale controllo è stato poi confrontato con delle logiche più semplici di tipo Rule Based (controllo ON-OFF, controllo tramite Schedule prefissate e PID controller basato sul valore di illuminamento) e risulta che la logica fuzzy è la migliore strategia per il risparmio di energia di raffrescamento (si ha una riduzione del 44% rispetto a un vetro statico chiaro), se si considera invece il risparmio energetico totale la strategia più performante è quella basata sul PID controller, seguita dalla logica fuzzy.

Le strategie basate sui Model Predictive Control (MPC) ad oggi sono quelle con maggiori potenzialità per il controllo dei componenti attivi dell'edificio [22]. Il modello risolve un problema di ottimizzazione e ad ogni step determina la sequenza di controllo su un certo orizzonte temporale (*control horizon*), minimizzando una determinata funzione di costo (ad esempio il risparmio energetico dell'edificio) su un orizzonte temporale più ampio (*prediction horizon*) [2]. È stato provato che ha diversi vantaggi rispetto alle strategie di controllo Rule Based, come ad esempio la capacità di ritardare il picco del carico ed è in grado di far fronte a errori durante l'esecuzione dovuti alle fluttuazioni delle variabili esogene [23] La robustezza del modello è dovuta al suo cosiddetto *receding horizon*: l'MPC risolve il problema di ottimizzazione nel *prediction horizon*, applica il controllo scelto al successivo *control horizon* e risolve nuovamente il problema di ottimizzazione, aggiornandosi quindi ad ogni timestep.

Favoino et al [2] hanno analizzato le prestazioni energetiche di un vetro fotovoltacromico attraverso 9 strategie di controllo, sia Ruled Based che mediante l'implementazione di MPC. I controlli sono stati confrontati su 3 climi diversi (Roma, Londra e Sydney) e i risultati mostrano che i controlli basati sul MPC sono in grado di ridurre il divario tra i diversi obiettivi di prestazione a cui un edificio deve rispondere, mantenendo un risparmio del 5-12% rispetto a un sistema vetrato statico altamente performante.

2.5 Software di simulazione energetica e co-simulazione

Modellizzare il comportamento delle smart window non è affatto banale, dovuto essenzialmente ad una mancanza di un software di simulazione che tenga conto degli aspetti dinamici di tali componenti; un altro aspetto da non sottovalutare è mancanza di un unico tool simulativo che permettano l'implementazione di controlli dinamici di tale tecnologia. È stato necessario dunque implementare un framework simulativo, una versione semplificata dell'Adaptive Facades Simulation Tool (AFast) creato da Favoino [24] con l'obiettivo di poter simulare i sistemi trasparenti dinamici e poter valutare le prestazioni energetiche ottenute tramite i diversi controlli degli stessi. Il framework simulativo è costituito dai seguenti software:

- EnergyPlus utilizzato per la valutazione degli indicatori delle prestazioni energetiche dell'edificio;
- Matlab utilizzato per implementare il controllo dei vetri dinamici;
- BCVTB utilizzatore per la co-simulazione dei due programmi;

2.5.1 EnergyPlus

EnergyPlus [25] è un software sviluppato dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America per la simulazione energetica di un edificio. Oltre all'energia richiesta dall'edificio, il programma è usato per il calcolo dei carichi termici, per la modellazione degli impianti HVAC (Heating Ventilation and Air Conditiong), per la verifica di comfort termico o il calcolo delle emissioni di inquinanti atmosferici (NO_x, CO e CO_2). EnergyPlus è infatti una raccolta di numerosi moduli di programmi che lavorano insieme per il calcolo dell'energia richiesta dall'edificio, simulando l'edificio e i sistemi energetici esposti a condizioni operative e ambientali diverse. Il nucleo centrale della simulazione è il modello dell'edificio basato su principi fondamentali delle leggi della termodinamica.

Essendo un modello deterministico, bisogna inserire su EnergyPlus tutte le caratteristiche dei componenti d'involucro, dell'impianto e dell'ambiente esterno con cui l'edificio interferisce. È possibile inserire tali caratteristiche nell'editor di testo in formato .txt oppure tramite un editor dedicato in formato .idf. Il software è formato da una serie di classi costituiti da più *Object* che servono ad inserire tutti i dati necessari.

EnergyPlus è il software utilizzato maggiormente per modellare gli aspetti dinamici dei sistemi adattivi, grazie all'introduzione del linguaggio EnergyPlus Runtime (ERL) che permette di implementare l'Energy Management Systems (EMS). Per l'implementazione dei sistemi dinamici vengono inseriti solo alcuni stati intermedi delle smart glazing, generalmente i più significanti per coprire tutta la gamma del range di valori che possono assumere.

2.5.2 Energy Management Systems

L'Energy Management Systems (EMS) [26] permette di modificare durante la simulazione alcune caratteristiche del modello in base a determinate regole di controllo del tipo *if-else* definite dall'utente. L'architettura del EMS è essenzialmente costituita da:

- Sensori (*EnergyManagementSystem:Sensors*): costituiscono i dati di input del programma di simulazione; possono essere dei dati di input di EnergyPlus (dati climatici), dati di output calcolati dal modello stesso (temperature, carichi termici) oppure delle *Schedule* (stato del vetro, occupazione);
- Attuatori (*EnergyManagementSystem:Actuators*): viene identificata la parte del modello che deve essere modificata dal controllo (controllo sul HVAC, caratteristiche dell'involucro, apporti interni);
- Programma (*EnergyManagementSystem:Program*): costituisce l'algoritmo di controllo. È basato su regole del tipo if-else in base ai valori che vengono forniti dai sensori;

Quindi l'EMS può essere utilizzato per i controlli semplici dei vetri elettrocromici (di tipo Rule Based), modificando quindi la Construction del vetro elettrocromico (impostato come l'attuatore) in funzione dei valori soglia dei parametri di controllo (misurati dai sensori). Si devono definire quindi tante *Construction* quanti sono gli stati intermedi del vetro elettrocromico utilizzato.

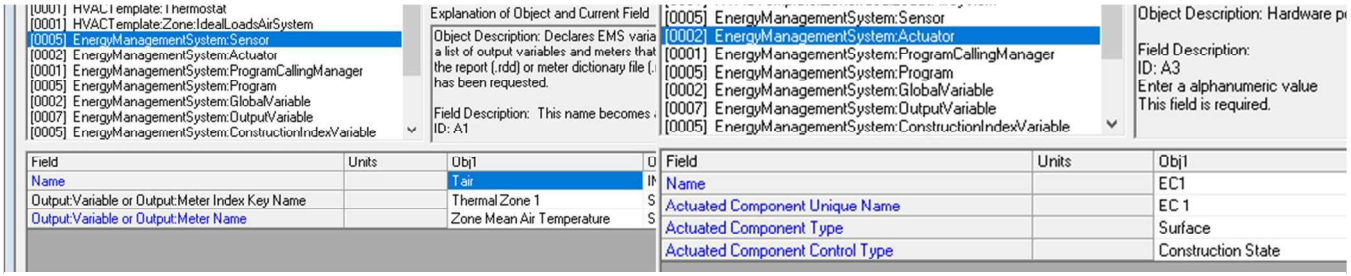

Figura 6 IDF editor EMS. Sensor (sinistra) Actuator (destra)

2.5.3 BCVTB

Building Controls VirtuaTest Bed (BCVTB) è un software che permetti di collegare differenti programmi di simulazione [27]. È basato sull'ambiente software Ptolemy II e permette di espandere le potenzialità dei singoli programmi di simulazione. I programmi collegabili attraverso BCVTB sono ad esempio EnergyPlus, TRNSYS, Radiance, ESP-r, MATLAB e Simulink. In particolare, per le analisi delle prestazioni dei controlli Model Based, BCVTB è utilizzato come ambiente di co-simulazione per collegare EnergyPlus con MATLAB, in cui è implementato il modello ridotto. Ad ogni timestep, EnergyPlus manda in input a MATLAB dei parametri prestabiliti; in base a questi l'algoritmo decide il controllo da attuare e lo invia nuovamente a EnergyPlus.

2.6 Set-up sperimentale

La sensoristica usualmente utilizzata per le attività sperimentali è costituita da termocoppie, piranometri e termoflussimetri.

Tutti i sensori sono stati collegati ad un unico Datataker, modello DT85 [28] con un totale di 34 canali di acquisizione. Per ogni canale è consentito collegare fino a un massimo di 3 termocoppie (configurazione *shared-terminal*) e di 2 termoflussimetri o piranometri (configurazione *indipendent*). Per ogni tipo di attività sperimentale, si sono definiti 2 tassi di scansione: il primo è il tasso di acquisizione delle misure (*scan rate*), mentre il secondo è il tasso delle medie. Il Datataker acquisisce i dati secondo un prefissato *scan rate* e fornisce solo i valori medi. Con l'ottica di implementare il controllo real-time dei vetri elettrocromici, è stata sviluppata una struttura IoT in grado di scaricare in automatico i dati memorizzati dal Datataker: il Datataker infatti è stato collegato alla rete Internet del Politecnico e tramite protocollo FTP (File Transfer Protocol) è possibile scaricare in modo automatico i dati su una cartella condivisa in rete.

Le termocoppie servono a misurare la temperatura e il loro funzionamento è basato sull'effetto Seebeck: una termocoppia è costituita da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale uniti tra di loro in un punto, detto giunzione calda che costituisce il punto nel quale viene misurata la temperatura; l'altra estremità è invece detta giunzione fredda. Quando esiste una differenza di temperatura tra i due giunti, si crea una differenza di potenziale elettrico tra i terminali del giunto freddo che è funzione della differenza di temperatura, secondo una legge non-lineare. Le termocoppie utilizzate sono di tipo T, in cui la giunzione è formata dalla coppia rame-costantana. Prima delle attività sperimentali è stata eseguita la taratura delle termocoppie: il processo di taratura consiste nel confrontare il valore di temperatura misurato dalle termocoppie con quello misurato da un campione di riferimento. Il campione di riferimento utilizzato è un termometro a resistenza di Platino a 4 fili con resistenza di 100 Ω a 0°C (Pt100).

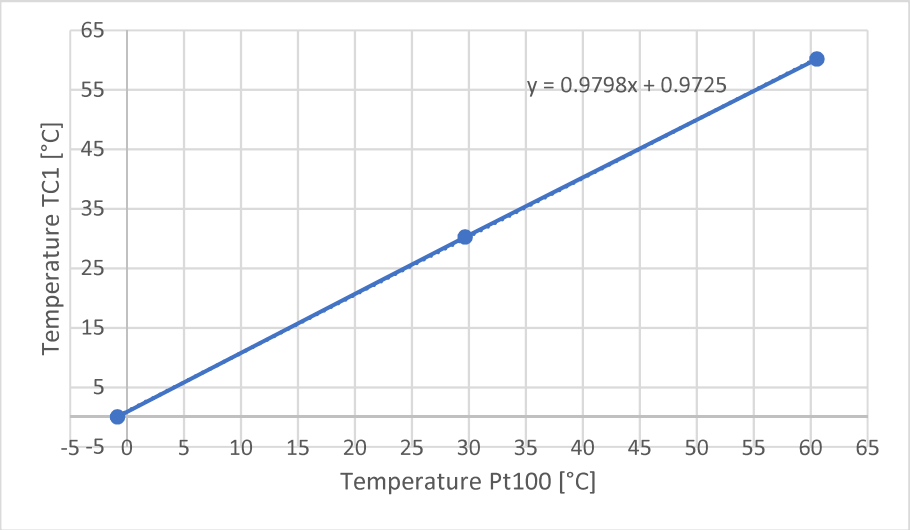

Figura 7 Curva di taratura della termocoppia TC1

La curva di taratura (Figura 7) è stata ottenuta su 3 valori distinti di temperatura 0°C, 30°C, 60°C in modo da coprire a pieno il range di temperatura all'interno della cella. Per la misura a 0°C è stata utilizzata una miscela bifase di acqua e ghiaccio mentre per le altre 2 misure è stato utilizzato il bagno termostatico. È importante sottolineare che la taratura è legata strettamente al canale di acquisizione a cui è collegata la termocoppia, per tale motivo dopo la taratura le termocoppie non possono essere spostate dal proprio canale di acquisizione. In totale sono state tarate 24 termocoppie di tipo T con un errore di misura pari a ± 0.3°C.

I termoflussimetri servono invece a misurare il flusso termico specifico. È formato da un composto plastico-ceramico che mantiene bassa la resistenza termica totale. Il termoflussimetro è una termopila, cioè un insieme di più termocoppie connesse in serie, che misura la differenza di temperatura ai capi del corpo ceramico. Tale differenza di temperatura è proporzionale al flusso che attraversa il sensore, che dipende solo dallo spessore e dalla conducibilità termica del materiale plastico-ceramico. I termoflussimetri lavorano in modo passivo e per la lettura del valore misurato è necessario collegarli a un voltmetro che lavori nel range dei mV. I termoflussimetri sono stati collegati quindi al Datataker e per convertire la tensione misurata nel flusso termico è necessario dividere la tensione U per la sensibilità S, fornita per ogni sensore. Per le prove sperimentali di questa tesi sono stati utilizzati i termoflussimetri della casa produttrice Hukseflux, modello HFP01 [29], con un'incertezza di misura del ± 5%.

Figura 8 Termoflussimetro (sinistra) e Piranometro esterno facciata Sud (destra)

I piranometri misurano invece la radiazione solare globale incidente il sensore. È costituito da 2 componenti principali: una termopila con rivestimento nero e una cupola di vetro. Il rivestimento nero assorbe tutta la radiazione solare e la converte in calore, causando un aumento di temperatura registrato dalla termopila. Il segnale di uscita dalla termopila è quindi proporzionale all'irraggiamento solare. La cupola ha una duplice funzione: limita lo spettro solare da 290 a 3000 nm e protegge il sensore termico dall'ambiente esterno (umidità, polvere,

pioggia). I piranometri utilizzati nelle attività sperimentali sono della casa produttrice Hukseflux, modello LP02 [30], con un'incertezza di misura del ± 3%.

2.6.1 Accorgimenti particolari

Durante la progettazione del set-up sperimentale, si è prestata particolare attenzione agli errori di misura dovuti alla radiazione solare incidente i sensori; per questo motivo sono stati utilizzati i seguenti accorgimenti, basati su esperienze di attività precedenti nella medesima cella di prova [31][32]:

Le termocoppie per la misura della temperatura dell'aria interna sono state schermate dalla radiazione solare tramite dei cilindri di cartone;

Le termocoppie utilizzate per la misura della temperatura superficiale esterna sono state schermate da semi-cilindri di materiale plastico ricoperto da nastro alluminato Figura 9;

È stato applicato del nastro alluminato sulla superficie esterna dei 3 componenti vetrati per schermare le termocoppie e i termoflussimetri posizionati sulla faccia interna Figura 10;

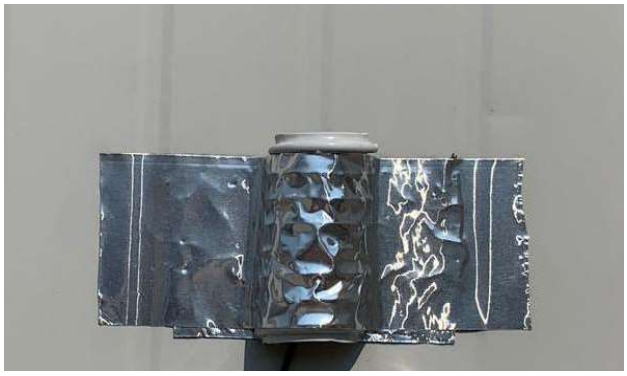

Figura 9 Schermatura termocoppie superficiali esterne

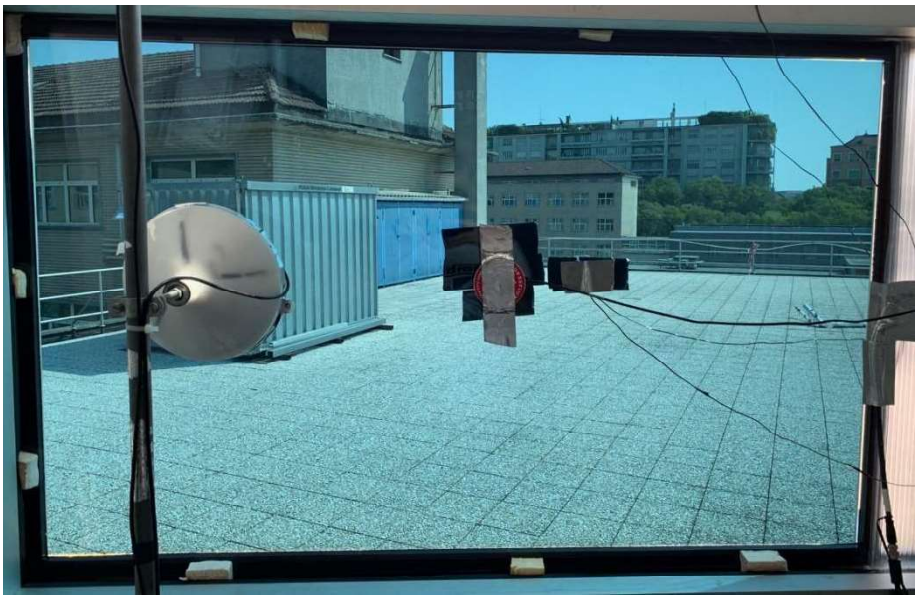

Figura 10 Sensori e protezioni utilizzati per i vetri. A sinistra piranometro con lo schermo protettivo, a destra termoflussimetro e termocoppia superficiale interna ed esterna schermate all'esterno con nastro alluminato

Sono stati utilizzati degli schermi plastici per schermare i piranometri interni in modo tale che i sensori misurino solo la radiazione solare trasmessa attraverso i componenti vetrati e non quella proveniente dall'interno della cella (radiazione riflessa dalle pareti interne). Nelle fasi preliminari sono state svolte delle misure con lo scopo di decidere quale fosse il migliore rivestimento interno dello schermo, in grado di assorbire la radiazione incidente il cono stesso in modo che il piranometro misuri solo la radiazione solare trasmessa dai vetri. Vi erano a disposizione infatti tre tipologie di rivestimento (nero opaco, bianco e argento) e per decidere quale fosse il migliore sono stati utilizzati 3 piranometri, uno per ogni rivestimento, posizionati all'esterno della cella con lo stesso orientamento del piranometro verticale posizionato sulla facciata Sud della cella. Il miglior rivestimento corrisponde dunque al piranometro che misura la stessa radiazione solare del piranometro esterno: minore è lo scostamento dal piranometro verticale, maggiore sarà quindi la radiazione assorbita dal rivestimento interno dello schermo. Nel grafico di Figura 12 sono riportati gli andamenti della radiazione solare misurata dai 3 piranometri schermati, a confronto con il piranometro di riferimento. È stato dunque scelto il rivestimento nero opaco perché è quello con un minore scarto dal riferimento.

Figura 11 Particolare del piranometro interno schermato

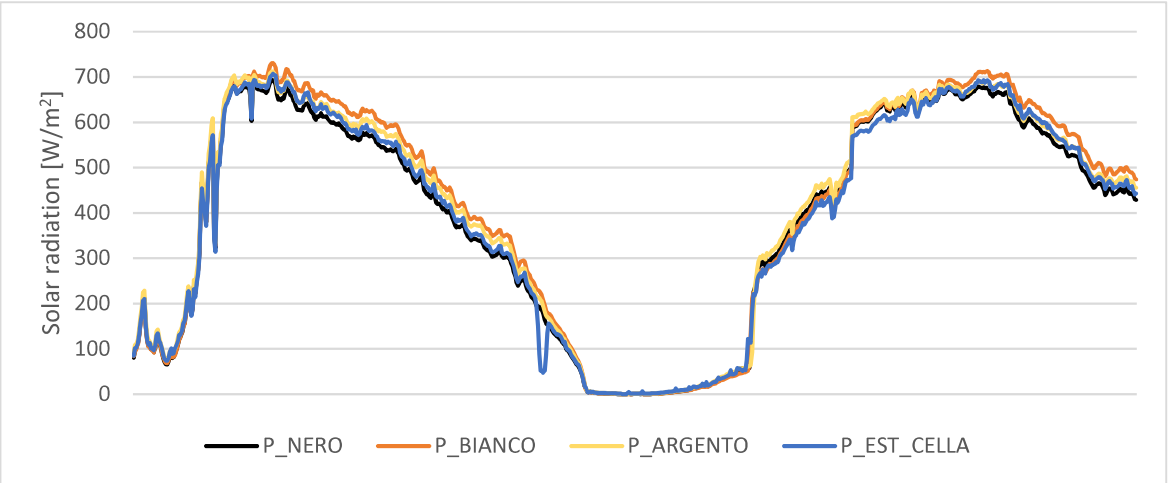

Figura 12 Confronti piranometri esterni

La pavimentazione esterna del tetto del laboratorio è costituita da mattoni di colore chiaro altamente riflettenti; per evitare che la radiazione solare incidente sul pavimento esterno influenzi le misure dei piranometri, è stato posizionato un telo di colore nero in corrispondenza della facciata Sud in modo da ridurne l'albedo.

2.7 Caratterizzazione

Per la caratterizzazione dei componenti opachi della cella di prova è stata seguita la procedura descritta nella normativa EN ISO 9869-1:2014 [33]. L'obiettivo della caratterizzazione è valutare il valore di trasmittanza termica U del componente e a tal fine è stato montato per ogni componente opaco un termoflussimetro sul lato interno e due termocoppie, una sul lato interno e una su quello esterno, per misurare rispettivamente il flusso termico specifico che attraversa il sensore e le temperature superficiali, interna ed esterna, del componente. I sensori devono essere posizionati in punti rappresentativi della parete e quindi lontano da eventuali ponti termici o variazioni di geometria della facciata. È stata misurata anche la temperatura dell'aria interna tramite 4 termocoppie posizionate in punti diversi della cella a 1.6 m dal pavimento.

Il metodo delle medie progressive permette il calcolo della conduttanza utilizzando i valori medi di flusso termico e differenza di temperatura misurati su tutti gli istanti precedenti anziché considerare solo i valori istantanei. In questo modo si tiene conto dell'inerzia termica del componente opaco. Rappresentando l'andamento della conduttanza in funzione del tempo si può osservare se il sistema converge al valore di conduttanza di equilibrio oppure se sono presenti oscillazioni rilevanti. Secondo la norma, il sistema converge se le oscillazioni rispetto al valore asintotico sono minore di 0.05 W/m²K. Utilizzando quindi il metodo delle medie progressive, si valuta il valore della conduttanza secondo la formula:

$$C = \frac{\sum Q_i}{\sum (T_{in} - T_{out})_i} \tag{2.1}$$

Si calcola poi la trasmittanza termica totale U a partire dai valori della conduttanza di equilibrio a cui si aggiungono le resistenze superficiali interne ed esterne, che tengono conto del calore scambiato per conduzione e convezione con l'ambiente circostante:

$$U = R_{si} + \frac{1}{C} + R_{se} \tag{2.2}$$

La UNI EN ISO 6946:2008 [34] fornisce i valori standardizzati delle resistenze superficiali interne ed esterne a seconda della direzionalità del flusso termico:

	Flusso ascendente	Flusso orizzontale	Flusso discendente
R_{si} [m²K/W]	0.1	0.13	0.17
R_{se} [m²K/W]	0.04	0.04	0.04

Tabella 1 Coefficienti liminari interni ed esterni secondo la normativa UNI EN ISO 6946:2008 [34]

2.8 Blower Door Test

Lo scopo del Blower Door Test è di verificare la permeabilità all'aria dell'edificio e di ricavare il valore del tasso di ricambi d'aria (ACH). La normativa di riferimento è la UNI EN ISO 9972:2015 [35] che prevede l'utilizzo di un ventilatore a velocità variabile incassato nel telaio della porta principale dell'abitazione con lo scopo di immettere o estrarre un certo flusso di aria dall'ambiente. In base al flusso di aria si crea quindi una differenza di pressione tra ambiente interno ed esterno, da cui dipende l'ermeticità dell'edificio. Per avere una buona curva di regressione, durante la prova bisogna estendere il più possibile il range della differenza di pressione misurata e quindi la quantità di aria passante attraverso il ventilatore; a tal fine si varia la velocità di rotazione del ventilatore e si varia il numero dei fori tappati della griglia metallica in cui è incassato il ventilatore.

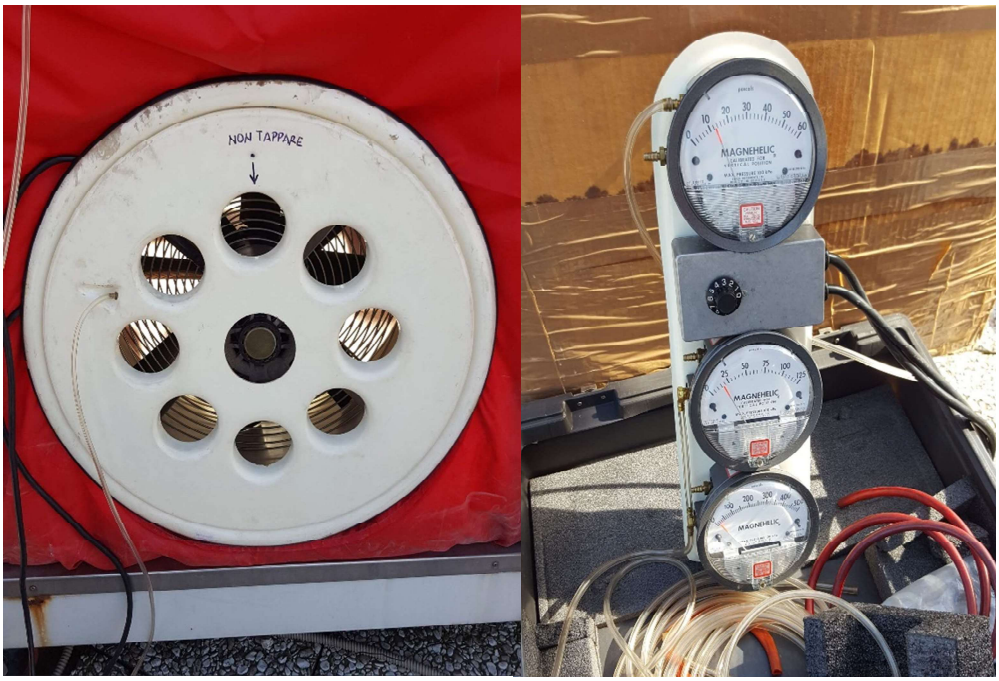

Figura 13 Particolare degli strumenti utilizzati per la Blower door: ventilatore con struttura forata (sinistra), manometri (destra)

Si utilizzano poi due manometri, uno misura la differenza di pressione tra ambiente interno e ambiente esterno (indicata come Δp_{room}), l'altro misura invece la differenza di pressione a monte e a valle del ventilatore (indicata come Δp_{fan}).
In particolare, la pressione relativa al ventilatore serve a calcolare la portata di aria che attraversa il ventilatore; non avendo un misuratore di portata è stata utilizzata una relazione che correla la portata d'aria con la pressione relativa del ventilatore:

$$Q = a \cdot \left(\Delta p_{fan}\right)^{b} \tag{2.3}$$

I valori dei coefficienti a e b dipendono dal ventilatore utilizzato e sono riportati in Tabella 3 in funzione del numero di buchi tappati (PH):

PH	0	4	6	7
a	81.2	62.7	36.4	23.2
b	0.51	0.497	0.468	0.466

Tabella 3 Coefficienti a e b

Trovati i valori della portata del ventilatore, si va a rappresentare graficamente il valore del flusso di aria in funzione della differenza di pressione della cella con lo scopo di trovare una funzione che correli il valore del flusso di aria con la differenza di pressione della cella. Tramite il metodo dei minimi quadrati si trova quindi una legge di potenza del tipo:

$$Q = k \cdot (\Delta p_{room})^{\alpha} \tag{2.4}$$

In cui l'esponente α di norma viene imposto al valore di 0.67. Tramite l'estrapolazione, è possibile andare a calcolare il valore del flusso di aria che si ha quando la differenza di pressione della cella è pari a 50 Pa, indicato con Q_{50}. Tale valore è utilizzato per la stima dei ricambi d'ora, secondo la legge empirica:

$$n_{avg} = \frac{1}{20} \cdot \frac{Q_{50}}{V} \tag{2.5}$$

Si utilizza come valore di riferimento 50 Pa perché corrisponde a vento con intensità 5 della scala di Beaufort.

La norma poi descrive due metodi di prova da utilizzare in funzione delle condizioni dell'impianto:

- Metodo A: prova di un edificio in uso;
- Metodo B: prova dell'involucro edilizio;

Per il Metodo A occorre chiudere tutte le aperture esterne presenti nell'edificio di prova come ad esempio porte e finestre, mentre per il Metodo B bisogna sigillare anche le possibili aperture esistenti come ad esempio le bocchette di immissione dell'aria o le griglie di ripresa.

2.9 Calibrazione

L'obiettivo della calibrazione è trovare un fit ottimale tra i valori simulati dal modello energetico e quelli misurati, in modo che si possa utilizzare il modello simulativo per andare a studiare le prestazioni energetiche di un edificio in modo più veloce ed economico. Per una buona calibrazione occorre inserire minuziosamente tutti i dati che si hanno a disposizione, riportando le caratteristiche geometriche effettive, l'orientazione, le eventuali ostruzioni circostanti e le stratigrafie dei componenti. L'approccio tipicamente utilizzato per la calibrazione è quello

empirico, basato sulla modifica dei parametri per tentativi ed errore: partendo dai dati in input, si confrontano i valori misurati con quelli stimati dal modello; se gli indici di validazione sono rispettati allora il modello è calibrato, in caso contrario occorre andare a modificare alcuni parametri caratteristici dell'edificio fino a quando non viene raggiunta la validazione del modello energetico.

I modelli di simulazione energetica degli edifici utilizzano i file climatici per conoscere le caratteristiche dell'ambiente esterno in cui edificio ed impianto dovranno funzionare; tramite il file climatico determinano ad esempio le dispersioni, le perdite per infiltrazione e i carichi solari. Per la calibrazione è dunque necessario conoscere le condizioni metereologiche dell'ambiente esterno durante il periodo di misura. Per questo motivo sono stati utilizzati i dati provenienti dalla stazione meteo del Politecnico di Torino [36] da cui è possibile ricavare i seguenti dati, forniti al quarto d'ora:

- Temperatura dell'aria esterna [°C];
- Umidità relativa [%];
- Pressione atmosferica [hPa];
- Velocità del vento [m/s];
- Direzione del vento [°]
- Radiazione solare globale [W/m^2];

Si è proceduto quindi a modificare il file climatico standard, andando a inserire i dati reali misurati dalla stazione meteo solo per i giorni in cui sono state svolte le campagne di misura per la calibrazione, con l'accortezza di modificare i dati meteo di una settimana prima l'inizio delle misure per tenere conto del periodo di inizializzazione di EnergyPlus. In particolare si è utilizzato il software Elements [37] che permette di andare a modificare in modo semplice il file climatico direttamente nel formato .epw di EnergyPlus.

La stazione meteo del Politecnico fornisce il valore della radiazione solare globale; nel file climatico di EnergyPlus è necessario inserire anche le componenti della radiazione solare diretta e diffusa. Per questo motivo è stato utilizzato il tool RadSol v0.14 sviluppato dalla Dott.ssa Ylenia Cascone, ricercatrice del gruppo TEBE del Politecnico di Torino. Basato sul modello di radianza di Perez, il tool permette di scomporre la radiazione solare globale nelle due componenti diretta e diffusa.

2.9.1 Validazione del modello

La validazione del modello è stata svolta sia in forma qualitativa che quantitativa. Per la validazione qualitativa viene riportato il confronto tra i valori misurati e quelli simulati dal modello dei profili di temperatura dell'aria interna, delle temperature superficiali dei componenti opachi e trasparenti e della radiazione solare trasmessa dai componenti vetrati.

Per la validazione quantitativa sono stati utilizzati invece i seguenti indici di validazione:

- Normalized Mean Bias Error (NMBE)

È l'errore percentuale utilizzato per quantificare l'accuratezza del modello di simulazione per la stima dei parametri misurati in un certo intervallo temporale:

$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{sim} - X_{exp}\right)}{\sum_{i=1}^{n} X_{exp}} \cdot 100\% \tag{2.6}$$

in cui n è il numero totale delle misurazioni svolte durante il periodo di misure, X_{sim} e X_{exp} sono rispettivamente il valore simulato e il valore misurato del parametro preso come riferimento.

Tale indice potrebbe essere influenzato dagli errori di compensazione: la differenza al numeratore potrebbe essere positiva o negativa in intervalli di tempo differenti, riducendo così il valore effettivo di tale indice. Per tale motivo, per la validazione del modello è necessario utilizzare un indice addizionale, il coefficiente dell'errore quadratico medio:

- Coefficient of the root-mean-square error, CV(RMSE)

È l'errore percentuale che rappresenta la misura normalizzata della variabilità tra i dati misurati e simulati e permette di quantificare la stima fatta dal modello simulativo rispetto ai dati misurati: minore è il valore del CV(RMSE), migliore sarà la calibrazione del modello.

$$CV(RMSE)(\%) = \frac{RMSE}{A} \cdot 100\% \tag{2.7}$$

A è il valore medio della grandezza presa in esame nel periodo di tempo considerato, mentre RMSE è l'errore medio quadratico medio così definito:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{sim} - X_{exp}\right)^2}{n}} \tag{2.8}$$

I valori soglia per considerare se un modello sia calibrato o meno sono reperibili nella ASHRAE Guideline 14:2002 [38] in base al tipo di intervallo di tempo considerato, orario o mensile:

Indice statistico	Dati mensili	Dati orari
NMBE	±5%	±10%
CV(RMSE)	15%	30%

Tabella 2 Parametri per la validazione del modello, ASHRAE Guideline 14:2002 [38]

2.10 Identificazione del modello grey box

Esistono principalmente tre tipi di modelli:

- Modello white-box

Nel modello vengono inserite in modo dettagliato tutte le caratteristiche fisiche dei componenti che costituiscono l'edificio. È un modello di tipo deterministico che minimizza l'incertezza del modello utilizzando le leggi fisiche che descrivono il sistema. Ad esempio, EnergyPlus è un modello white-box perché predice il comportamento energetico di un edificio utilizzando le leggi della termodinamica applicata, tenendo conto quindi della fisica del sistema e dell'interazione di questo con l'ambiente circostante.

- Modello black-box

È un modello di tipo *data based*, in cui tutti i componenti di un sistema perdono il proprio significato fisico [39]. Il modello è appunto una scatola nera, che fornisce i dati di output in funzione dei dati di input forniti al modello senza avere alcuna informazione sulle relazioni fisiche del modello. Occorre un periodo di training, durante il quale vengono forniti al modello i dati storici del sistema fisico da caratterizzare e tramite un approccio *data-driven* (Machine Learning, Decsion Tree Analysis o Neural Network) il modello è in grado di implementare degli algoritmi decisionali. I modelli black-box hanno il vantaggio di essere di facile implementazione perdendo però l'accuratezza dei modelli white-box; uno degli svantaggi è dovuto al fatto che i modelli black-box, non conoscendo le equazioni fisiche che regolano il modello, non sono in grado di fornire informazioni con un'elevata precisione su condizioni mai accadute in passato.

- Modello grey-box

Sono definiti anche modelli ibridi, nel senso che includono i vantaggi dei due modelli appena descritti. Il modello *grey-box*, chiamato anche modello stocastico *state-space*, utilizza equazioni differenziali stocastiche (SDEs) che descrivono gli aspetti dinamici del sistema in modo continuo e un *data-set* di misure per la determinazione dei parametri che identificano il sistema fisico [40]. Dal white-box, eredita l'utilizzo delle equazioni per descrivere il comportamento fisico del sistema da modellizzare, ma tramite l'approccio *data-driven* si identificano dei parametri concentrati che descrivono il comportamento dell'intero sistema; in questo modo quindi il modello è in grado di descrivere bene condizioni non accadute nei dati di training perché è caratterizzato dalle equazioni stocastiche.

Dati i vantaggi appena descritti, per l'implementazione dei controlli *model based* si è scelto di utilizzare un modello di tipo grey-box. Sicuramente la parte più importante è l'identificazione dei parametri concentrati del modello e per tale processo si è seguito quanto descritto nelle pubblicazioni del gruppo di ricerca di Henrik Madsen [40][41][42].

I modelli grey-box sono in grado di descrivere il comportamento energetico degli edifici utilizzando l'analogia di un circuito elettrico con resistenze, capacitanze e sorgenti (per questo sono denominati anche modelli RC a parametri concentrati).

L'identificazione del modello può essere riassunta in 3 fasi:

1. Identificazione della struttura del modello
2. Stima dei parametri
3. Validazione del modello

2.10.1 Identificazione della struttura del modello

Per identificare il modello che meglio descrive il comportamento dell'edificio in esame è necessario identificare a priori tutti i processi di scambio termico che caratterizzano il sistema per avere un punto di partenza ottimale per l'identificazione del tipo di modello da utilizzare. I modelli utilizzati sono di tipo RC perché presentano un'analogia con i circuiti elettrici: le resistenze termiche sono modellate come resistori e le capacità termiche da capacitanze elettriche.

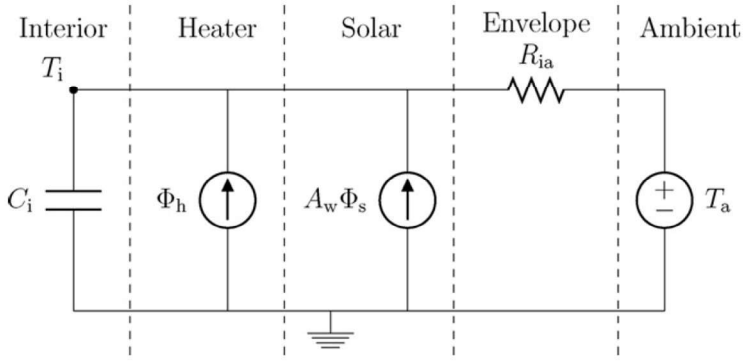

Figura 14 Circuito RC del modello Ti a singolo stato [41]

In Figura 14 è riportato lo schema di un circuito RC; ha una sola variabile di stato – la temperatura interna dell'aira Ti – descritta dalla seguente equazione differenziale stocastica:

$$\frac{dTi}{dt} = \frac{1}{R_{ia}C_i}(T_a - T_i) + \frac{1}{C_i}A_w\phi_s + \frac{1}{C_i}\phi_h$$

È il modello più semplice per la caratterizzazione di un edificio, in cui la variabile di stato Ti è calcolata a partire da 3 parametri concentrati, quali la resistenza termica tra interno ed esterno R_{ia}, la capacitanza dell'aria interna C_i che descrive l'abilità dell'edificio di immagazzinare calore all'interno dell'edificio, e l'area trasparente effettiva A_w. I valori di input, che costituiscono le condizioni a contorno del sistema, sono la temperatura dell'aria esterna T_a, la radiazione solare incidente la finestra ϕ_s e il flusso termico immesso in ambiente dall'impianto ϕ_h.

2.10.2 Stima dei parametri

Per la stima dei parametri viene utilizzato il pacchetto software CTSM implementato su R Studio. Tale pacchetto si basa sul metodo della massima verosimiglianza (*maximum likelihood*, ML) e applica il filtro Kalman, così come descritto in [42].

Il tool stima i parametri concentrati del modello in base ai dataset forniti al modello; per ogni parametro deve essere indicato il valore stimato iniziale, il valore massimo e il valore minimo entro cui può variare. Finito il processo di stima, vengono forniti i seguenti risultati per ogni parametro valutato:

- Il valore stimato;
- La deviazione standard del parametro stimato;
- p-value è il risultato del likelihood-ratio test [41];
- Pr (<|t|) è la probabilità che il parametro sia insignificante. Se il valore non è basso (normalmente deve essere minore di 0.05) potrebbe essere un'indicazione che il modello è over-parametrizzato;
- dF/dPar è la derivata della funzione obiettivo rispetto al parametro. Se il valore non è vicino a zero, la soluzione trovata non è quella ottimale e quindi bisogna cambiare qualche settaggio per l'ottimizzazione e ripetere la stima;
- dPen/dPar è la derivata della funzione di penalità rispetto al parametro stimato. Se il valore è significativo rispetto al valore di dF/dPar, allora il parametro è vicino a uno dei suoi limiti.

Infine, bisogna considerare la matrice di correlazione dei parametri stimati. Se la matrice di correlazione ha dei valori vicino a 1 o -1, ad eccezione dei valori della diagonale, allora è un'indicazione che il modello è over-parametrizzato e quindi bisogna eliminare almeno un parametro.

2.10.3 Validazione del modello

La validazione serve a verificare se il modello descrive i comportamenti fisici del sistema da caratterizzare. Solitamente la validazione del modello viene svolta su *data-set* diversi da quelli tramite cui è stata svolta la stima dei parametri concentrati, in modo da valutare come reagisce il modello con condizioni al contorno mai analizzate prima.

Si procede dunque con una validazione di tipo qualitativa del modello ridotto, rappresentando in un unico grafico gli andamenti dei dati di input, degli output e dei residui (differenza tra il valore misurato e quello stimato dal modello ridotto). Questo serve a valutare se il modello descrive bene tutti gli effetti che condizionano il modello o se si rilevano dei pattern caratteristici in corrispondenza di determinate situazioni al contorno. Se il modello ridotto non descrive bene gli effetti del modello fisico occorre aggiungere o eliminare i parametri concentrati fino a quando la validazione non è raggiunta.

3. Caratterizzazione della cella

In questo capitolo vengono affrontate nel dettaglio tutte le procedure attuate per la caratterizzazione delle proprietà termiche degli elementi d'involucro che costituiscono la cella di prova.

3.1 TWINS

Le attività sperimentali sono state svolte sulla Cella A delle TWINS (Testing Window Innovative System) [5], situate sul tetto del laboratorio del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino. La cella ha dimensioni interne 1.6 m, 3.5 m, 3 m, che corrispondono alle dimensioni delle facciate tipicamente utilizzate in edifici adibiti ad ufficio. La facciata esposta a Sud è l'unica che presenta componenti finestrati e si trova in condizioni di non ombreggiamento da elementi esterni; sulla facciata Nord è presente l'unica porta che permette l'accesso alla cella di prova. A Ovest della cella è presente una costruzione di dimensioni 2.2 m, 2 m, 2 m che ombreggia la parete Ovest durante le ultime ore del pomeriggio. La cella è montata su una struttura metallica che la solleva dalla pavimentazione di 14 cm.

Figura 15 Facciata Sud della TWINS

Il soffitto e le pareti della cella sono formati da pannelli sandwich di 48 mm, con doppia lamiera in acciaio e poliuretano espanso, mentre per il pavimento è stato aggiunto al sandwich uno strato di linoleum. Dal momento che non si conoscevano le caratteristiche termiche dei componenti opachi, è stata svolta la caratterizzazione sperimentale, descritta nel paragrafo 2.7, con lo scopo di individuare il valore delle trasmittanze termiche dei muri, del soffitto, del pavimento e della porta.

3.1.1 Set-up sperimentale

Gli schemi di Figura 17 e Figura 16 mostrano il posizionamento dei sensori utilizzati per la caratterizzazione. Sono stati utilizzati 20 sensori:

- 5 termocoppie per la misura della temperatura superficiale interna di ogni componente;
- 5 termocoppie per la misura della temperatura superficiale esterna di ogni componente;
- 4 termocoppie per la misura della temperatura dell'aria interna;
- 1 termocoppia per la misura della temperatura dell'aria esterna;

- 5 termoflussimetri;
- 5 piranometri;

Sono stati utilizzati i valori misurati in continuo per 5 giorni, dal 18 al 22 Febbraio 2019, impostando uno scan rate di 1 minuto e medie ogni 5 minuti (il programma di acquisizione è disponibile in Allegato I). Poiché l'impianto di climatizzazione non era funzionante è stato utilizzato un radiatore elettrico ad olio da 1.5 kW posizionato al centro della cella tra le termocoppie Tai_2 e Tai_3 e un ventilatore in modo d rendere omogenea la temperatura dell'aria interna della cella.

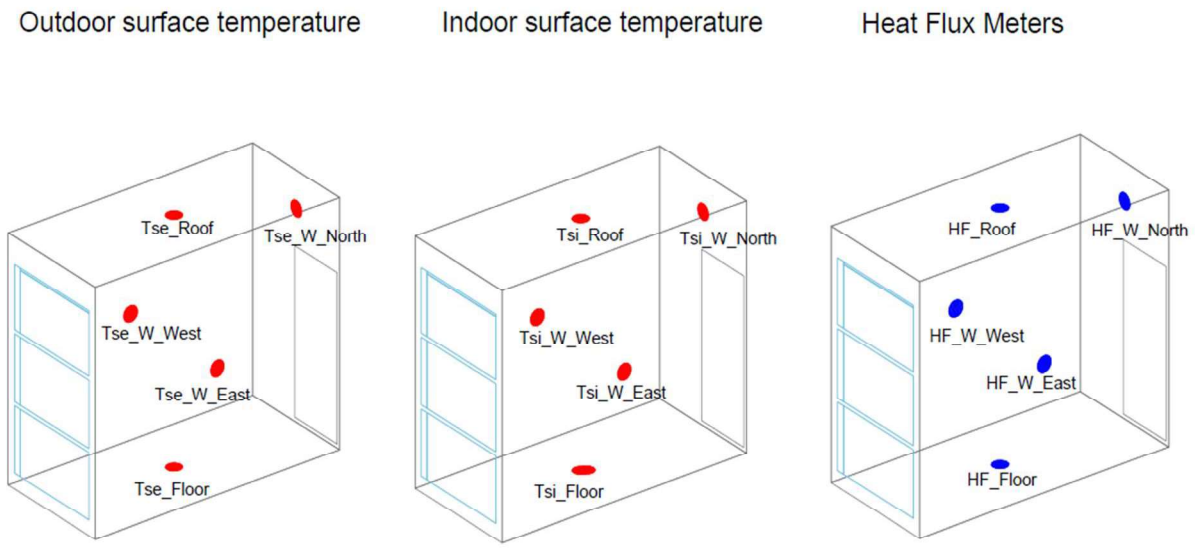

Figura 17 Schema sensori caratterizzazione opaco

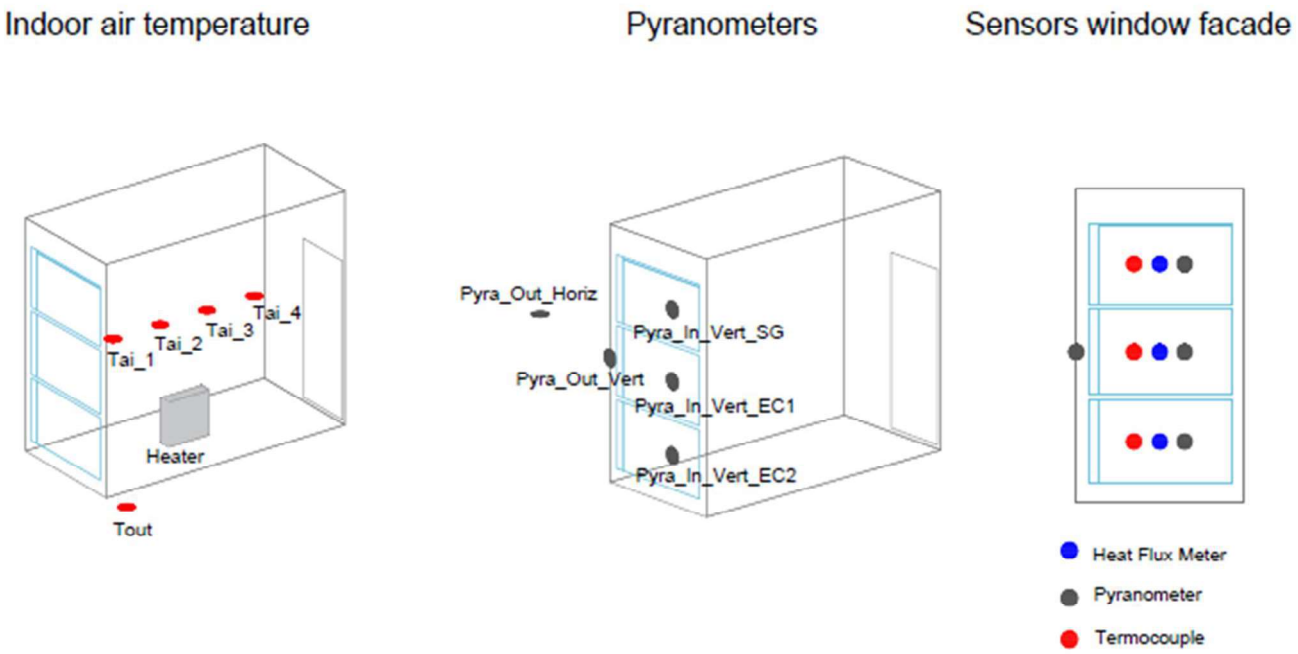

Figura 16 Schema sensori per la misura dell'aria interna (sinistra) e caratterizzazione dei vetri (destra)

3.1.2 Stima della conduttanza

Di seguito vengono riportati gli andamenti della conduttanza di due elementi opachi della cella presi come esempio. Il sistema raggiunge l'equilibrio dopo circa 24 ore, con piccole oscillazioni rispetto all'asintoto orizzontale. I valori della conduttanza dei componenti opachi si attestano tutti attorno ad un valore asintotico molto simile, pari a 0.52 W/m²K, ad eccezione del pavimento che converge a 0.81 W/m²K. Questa divergenza di valori è dovuta al fatto che il pavimento ha una stratigrafia diversa da tutti gli altri componenti per motivi strutturali e funzionali.

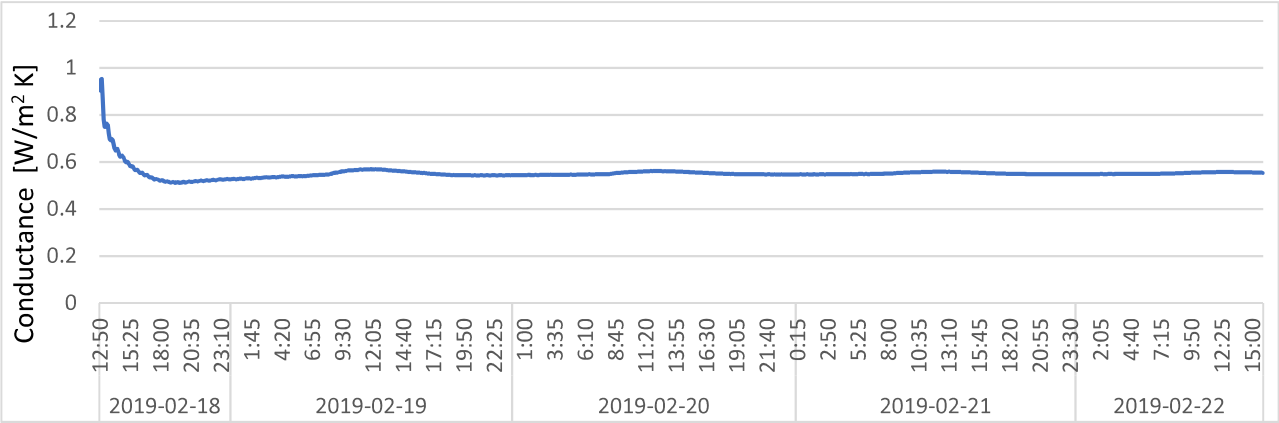

Figura 18 Andamento conduttanza parete Est

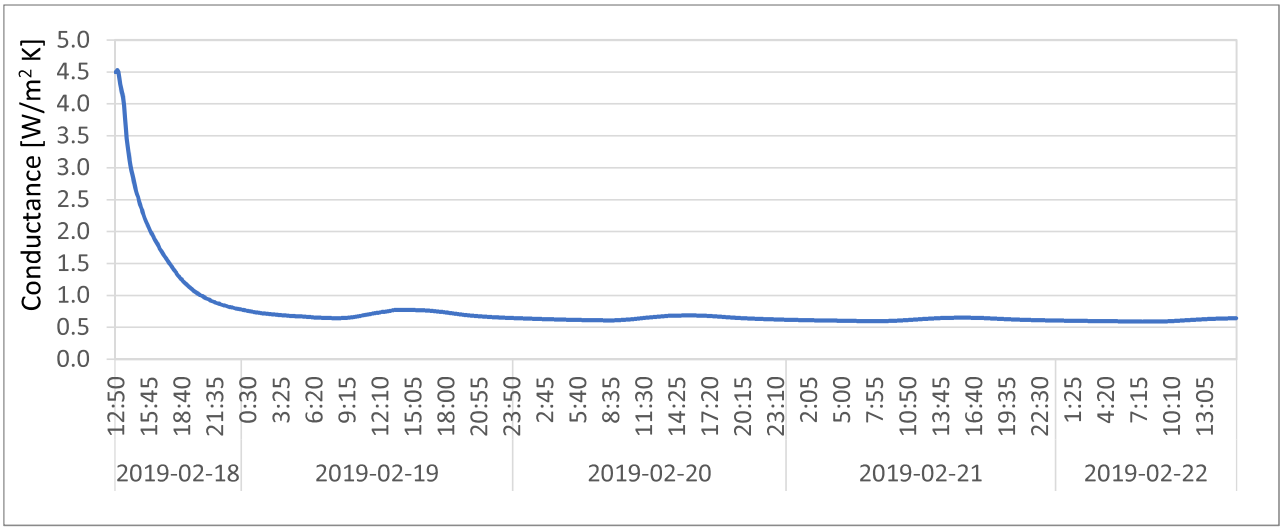

Figura 19 Andamento conduttanza pavimento

A partire dai valori della conduttanza di equilibrio, è stato dunque calcolato il valore della trasmittanza termica dei componenti opachi utilizzando la (2.5):

Componente	U [W/m^{2}K]
Parete Ovest	0.42
Parete Est	0.48
Parete Nord	0.48
Soffitto	0.49
Pavimento	0.70

Tabella 3 Trasmittanza termica dei componenti opachi della cella

Dal momento che i muri e il soffitto hanno la stessa stratigrafia, si è assunto un unico valore di trasmittanza termica, pari a 0.48 W/m^{2}K. La norma [33] infatti prevede di utilizzare come riferimento la parete Nord in modo da non considerare eventuali influenze dovute alla radiazione solare. Il valore così diverso per la parete Ovest è causato da un erroneo posizionamento della termocoppia superficiale esterna, messa in una posizione tale da essere ombreggiata dalle tubazioni dell'impianto di condizionamento attiguo durante le ore finali del giorno.

Figura 20 Interno cella. Vetri elettrocromici stato più chiaro (a sinistra) e stato più scuro (a destra)

3.2 Componenti trasparenti

La facciata Sud è l'unica ad essere vetrata. Per lo svolgimento della seguente tesi sono stati utilizzati 2 vetri elettrocromici e un vetro statico della casa produttrice AGC. In particolare, in alto è stato presente un vetro statico (indicato con SG), mentre al centro e in basso si trovano due vetri elettrocromici, modello HALIO. In Figura 20 Interno cella. Vetri elettrocromici stato più chiaro (a sinistra) e stato più scuro (a destra)Figura 20**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è mostrato il sistema vetrato della facciata Sud con vetri elettrocromici stato chiaro a sinistra e vetri elettrocromici stato più scuro a destra. Il vetro statico ha le stesse proprietà ottiche dello stato più chiaro dei vetri elettrocromici.

Le dimensioni dei 3 sistemi vetrati sono diverse rispetto al telaio in metallo della cella, per cui si sono riempiti gli spazi vuoti con il Plexiglas.

3.2.1 Vetro statico

Il vetro statico è un doppio vetro chiaro con lastra esterna di 6 mm, camera interna di 16 mm con Argon al 90%, lastra interna di 8.5 mm con rivestimento basso emissivo (low-e). In Tabella 1Tabella 4 sono riportate le proprietà termo-ottiche del doppio vetro:

Tvis(0°) [-]	Rfvis(0°) [-]	Rbvis(0°) [-]	Tsol(0°) [-]	Rfsol(0°) [-]	Rbsol(0°) [-]	g [-]	U [W/m²K]
0.671	0.158	0.162	0.393	0.232	0.324	0.471	1.2

Tabella 4 Caratteristice vetro statico

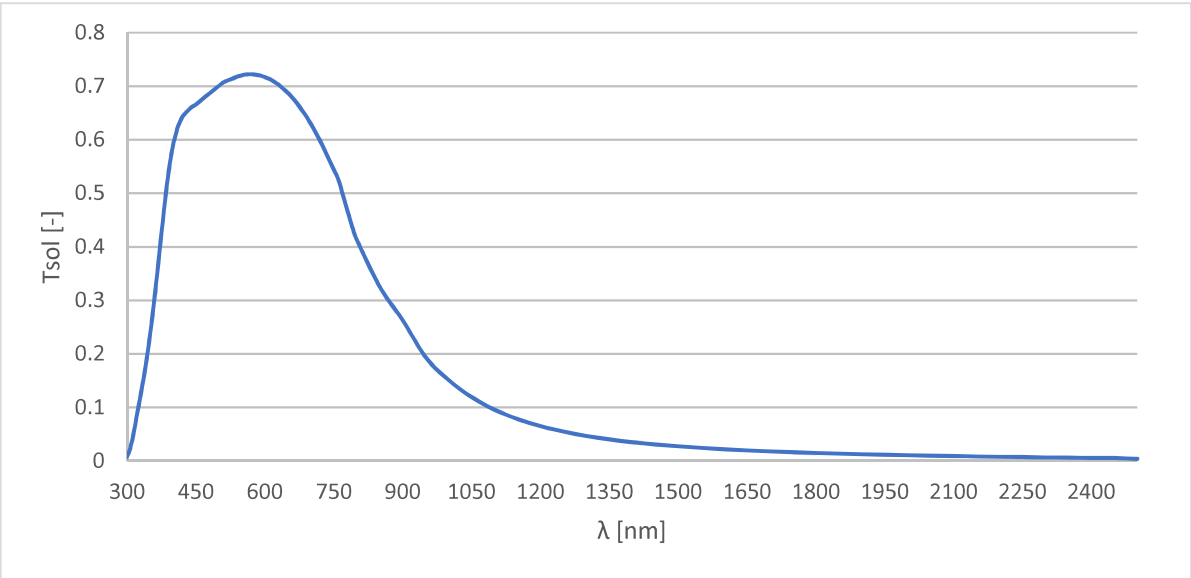

Figura 21 Andamento spettrale Tsol del vetro statico

3.2.2 Vetri elettrocromici

I due vetri elettrocromici sono formati da un laminato esterno spesso 10 mm, da una camera interna di 15 mm con Argon al 90% e da una lastra interna di 4 mm con rivestimento basso emissivo sul lato interno. Il laminato esterno è formato da due lastre di vetro spesse 4 mm che racchiudono lo strato elettrocromico spesso 2 mm. È stato scelto il modello HALIO della casa produttrice AGC perché è il modello più performante tra tutti gli elettrocromici; infatti è in grado di cambiare lo stato del vetro dal più chiaro al più scuro in meno di 3 minuti e questo sicuramente è uno dei punti di forza di tale tecnologia. In questo modo infatti è possibile controllare il vetro ad intervalli di tempo più fitti, a differenza dei primi vetri elettrocromici che necessitavano di un intervallo di tempo maggiore di 20 minuti per lo switch.

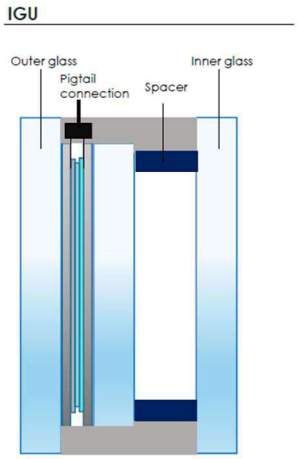

Figura 22 Stratigrafia HALIO [43]

I vetri elettrocromici possono assumere tutti gli stati intermedi che vanno dallo stato più chiaro (HALIO 73) a quello più scuro (HALIO 2); per la loro caratterizzazione però sono stati identificati 7 stati intermedi in base al valore del coefficiente di trasmissione nello spettro del visibile (Tvis,i) dello strato elettrocromico. In Tabella 5 e Tabella 6 sono riportate sia le proprietà ottiche dei singoli strati elettrocromici che quelle dell'intero componente vetrato.

Stato	Tsol,i(0°) [-]	Rfsol,i(0°) [-]	Rbsol,i(0°) [-]	Tvis,i(0°) [-]	Rfvis,i(0°) [-]	Rbvis,i(0°) [-]
HALIO 73	0.529	0.176	0.173	0.731	0.142	0.119
HALIO 46	0.264	0.139	0.124	0.456	0.09	0.101
HALIO 28	0.138	0.133	0.112	0.278	0.071	0.078
HALIO 14	0.064	0.13	0.109	0.143	0.64	0.069
HALIO 8	0.036	0.129	0.112	0.083	0.061	0.069
HALIO 4	0.016	0.129	0.12	0.039	0.059	0.072
HALIO 2	0.01	0.129	0.126	0.023	0.058	0.075

Tabella 5 Proprietà ottiche dei layer elettrocromici

Stato	Tvis(0°) [-]	Rfvis(0°) [-]	Rbvis(0°) [-]	Tsol(0°) [-]	Rfsol(0°) [-]	Rbsol(0°) [-]	g [-]	U [W/m²K]
HALIO 73	0.671	0.158	0.162	0.393	0.232	0.324	0.475	1.2
HALIO 46	0.414	0.0968	0.1335	0.211	0.148	0.301	0.321	
HALIO 28	0.249	0.0738	0.1172	0.1128	0.1342	0.2935	0.237	
HALIO 14	0.1275	0.0626	0.1106	0.0529	0.1301	0.2906	0.186	
HALIO 8	0.0742	0.0583	0.108	0.0295	0.1285	0.2897	0.166	
HALIO 4	0.0353	0.0545	0.1067	0.0137	0.121	0.2902	0.153	
HALIO 2	0.0208	0.0593	0.1011	0.008	0.1392	0.293	0.146	

Tabella 6 Proprietà ottiche intero componente vetrato

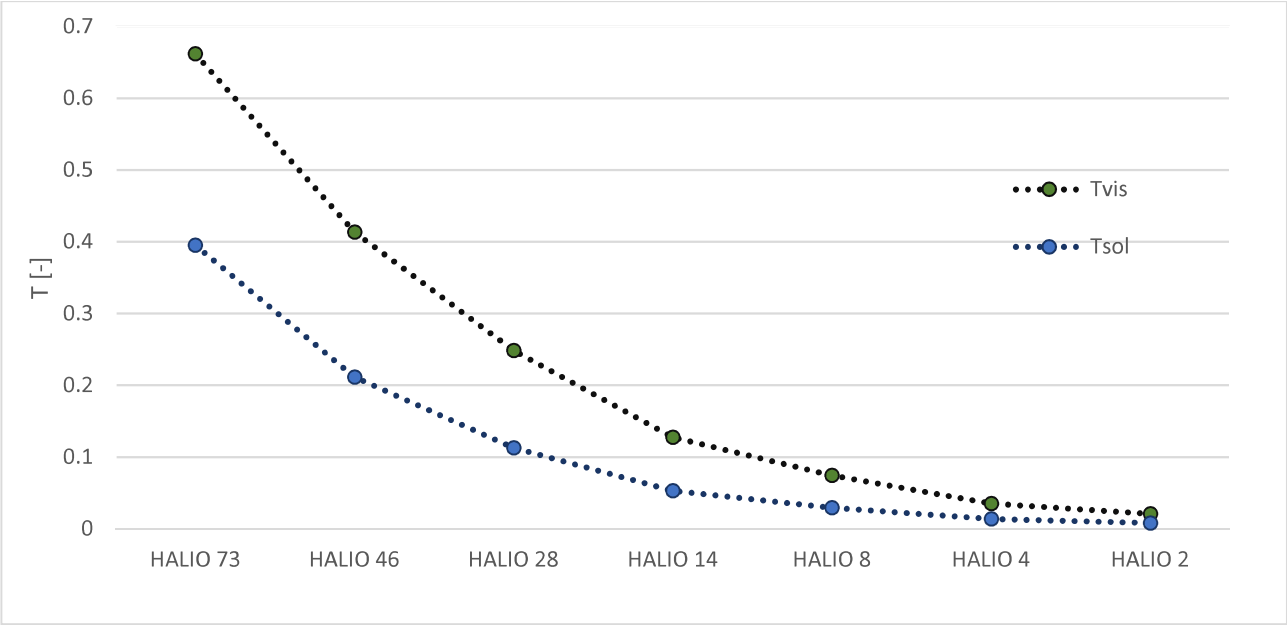

Figura 23 Andamento del coefficiente di trasmissione T in funzione degli stati HALIO intermedi

Per completare la caratterizzazione dei vetri elettrocromici, nei grafici seguenti sono riportati gli andamenti spettrali della Tvis e Tsol al variare dello stato del vetro:

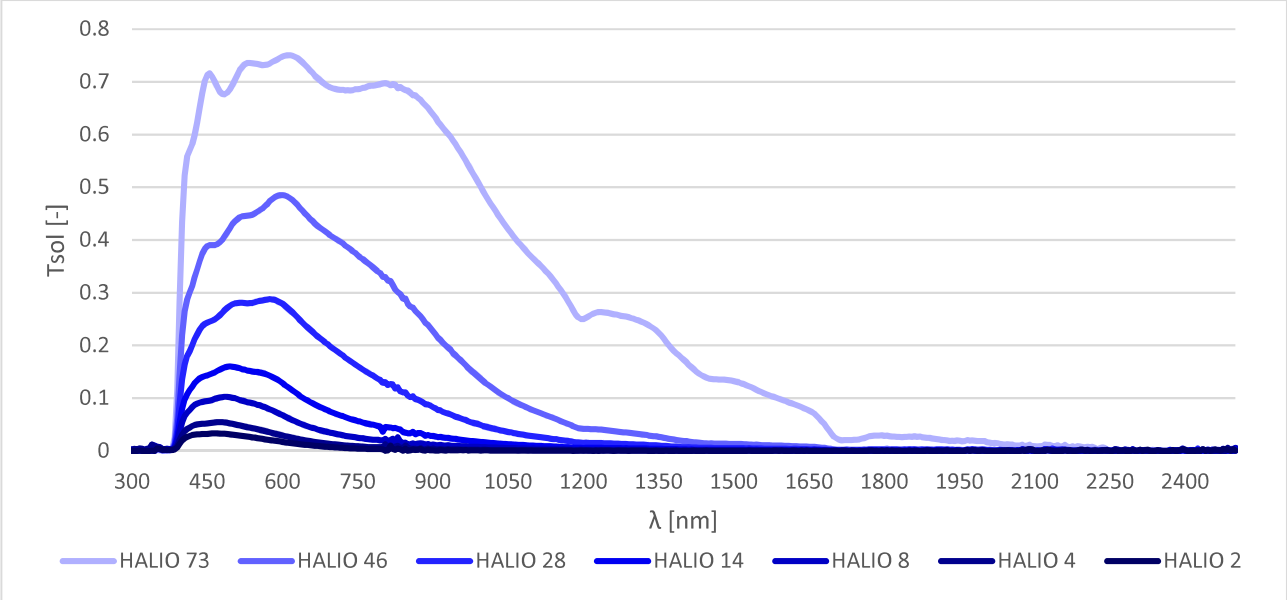

Figura 24 Andamento spettrale Tsol

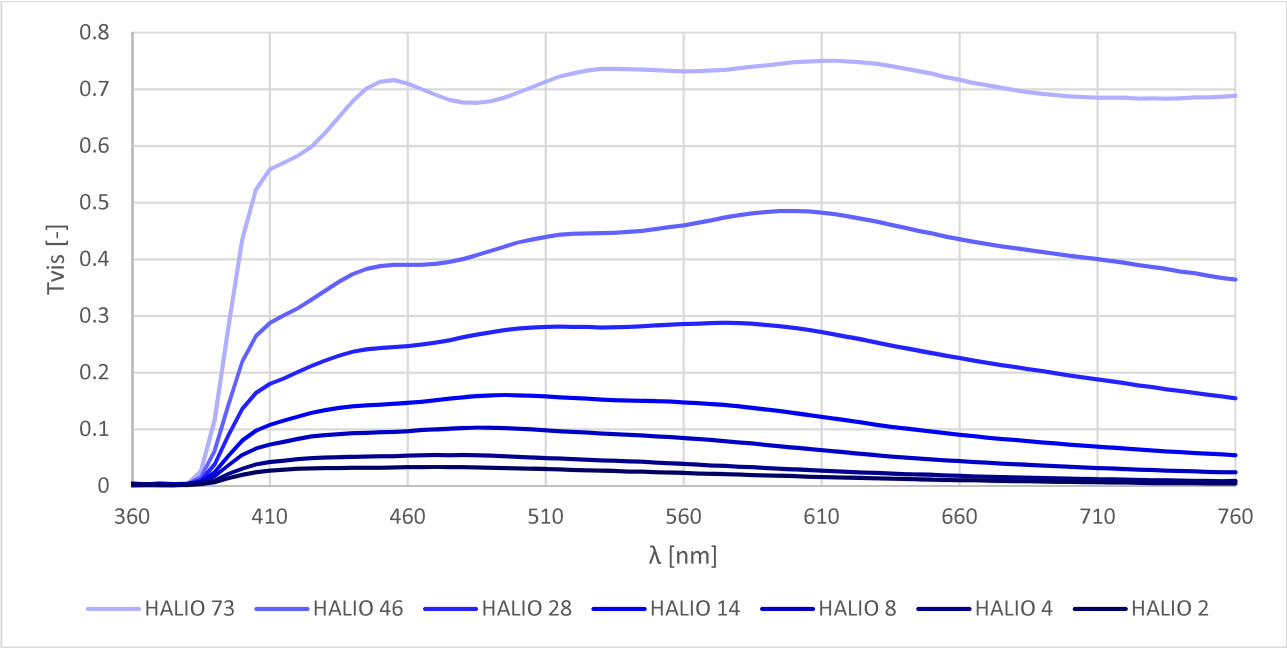

Figura 25 Andamento spettrale Tvis

3.3 Caratterizzazione Tsol

I valori finora descritti del coefficiente di trasmissione nello spettro del visibile e in quello solare sono riferiti al piano normale di incidenza; le proprietà ottiche dei vetri infatti variano al variare dell'angolo di incidenza φ formato tra la direzione dei raggi solari e il piano della superficie vetrata. Per caratterizzare gli stati degli elettrocromici, si è proceduto quindi alla misura sperimentale dei coefficienti di trasmissione nel modo seguente: per ogni vetro da caratterizzare, è stato posizionato un piranometro sul lato interno della cella in modo da misurare la quantità di radiazione trasmessa attraverso il componente; utilizzando poi il piranometro esterno verticale posto sulla facciata Sud è stata misurata la quantità di radiazione solare incidente la facciata. Conoscendo questi 2 parametri si è calcolato la Tsol, secondo la formula (3.1):

$$T_{sol,i}(\varphi) = \frac{Q_{Pyra_ver,i}}{Q_{Pyra_out,ver}} \tag{3.1}$$

L'angolo di incidenza φ è un angolo solido e dipende dall'orientazione della superficie e dall'altezza solare; tale valore è stato ricavato dalla simulazione energetica su EnergyPlus.

Per evitare gli effetti di bordo, sono stati presi solo i valori centrali del giorno, in particolare dalle 10:00 alle 16:00. Le misurazioni sono state svolte, impostando i vetri elettrocromici nello stato più chiaro, dal 27 Marzo al 2 Aprile con un *sample rate* di 1 minuto e media ogni 15 min. La Figura 26 conferma che i vetri elettrocromici nello stato più chiaro hanno le stesse caratteristiche ottiche del vetro statico.

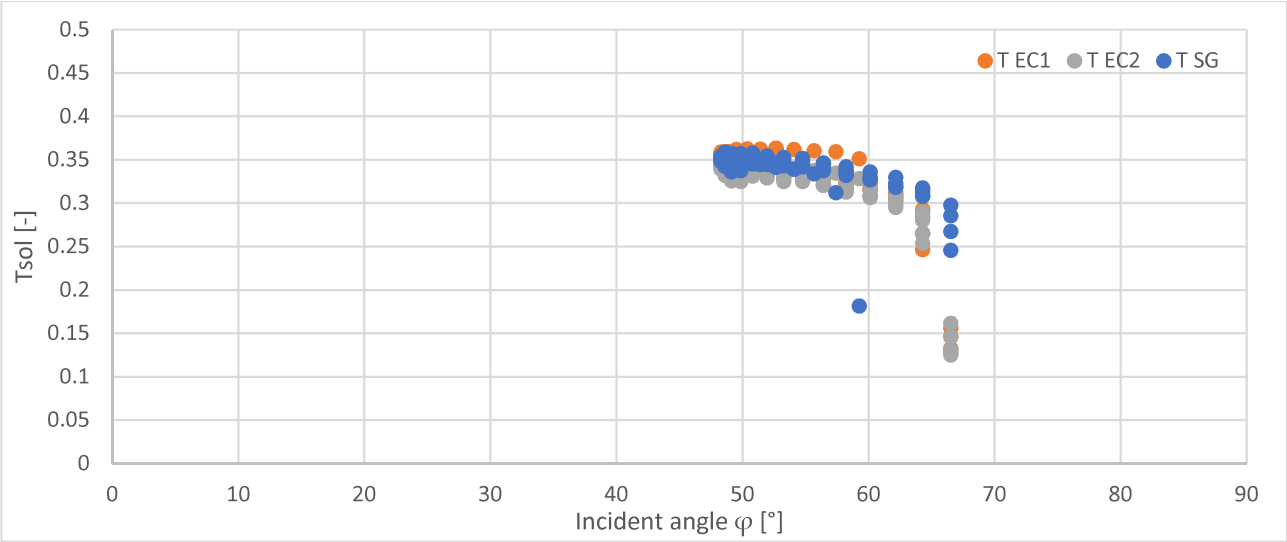

Figura 26 Andamento della Tsol in funzione dell'angolo di incidenza, state

EnergyPlus calcola le proprietà angolari dei vetri tramite una regressione polinomiale del quarto ordine a partire dalle proprietà riferiti al piano normale di incidenza:

$$\bar{T}(\varphi) = \bar{T}_0 + \bar{T}_1 \cos(\varphi) + \bar{T}_2 \cos^2(\varphi) + \bar{T}_3 \cos^3(\varphi) + \bar{T}_4 \cos^4(\varphi) \tag{3.2}$$

In cui i coefficienti polinomiali sono riportati sulla guida di EnergyPlus [25], in funzione del tipo di vetro:

$\bar{T}_i$	0	1	2	3	4
$\bar{T}_{bnz}$	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599

Tabella 7 Coefficienti polinomiali EnergyPlus [25]

Il valore trovato tramite la (3.2) deve poi essere moltiplicato per il valore di trasmittanza normale, che dipende dallo stato del vetro:

$$T(\varphi) = T(0°) \cdot \bar{T}(\varphi) \tag{3.3}$$

In questo modo è possibile andare a comparare i valori misurati sperimentalmente con quelli ricavati tramite la formula (3.3) per caratterizzare lo stato assunto dai vetri elettrocromici. Nel seguente grafico è riportato il confronto tra i valori angolari misurati e stimati; si può ritenere verificato che lo stato più chiaro del vetro corrisponde a HALIO 73.

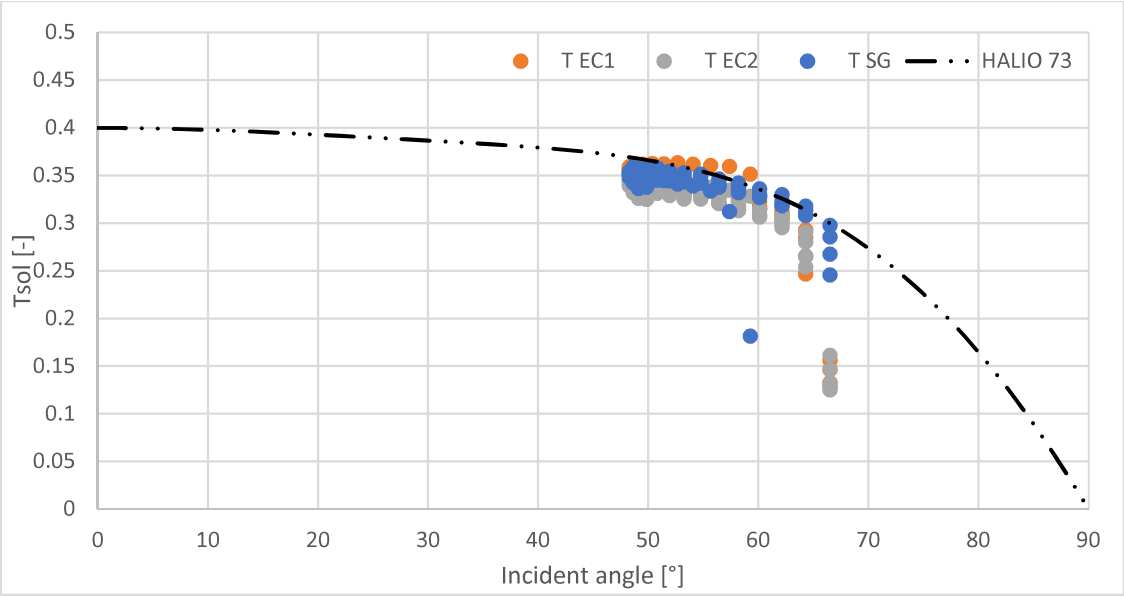

Figura 27 Caratterizzazione Tsol, clear state

Per la caratterizzazione dello stato più scuro dei vetri elettrocromici è stato svolto un procedimento analogo ai vetri chiari; in Figura 28 sono riportati gli output trovati seguendo tutti i passaggi descritti per i vetri nello stato chiaro.

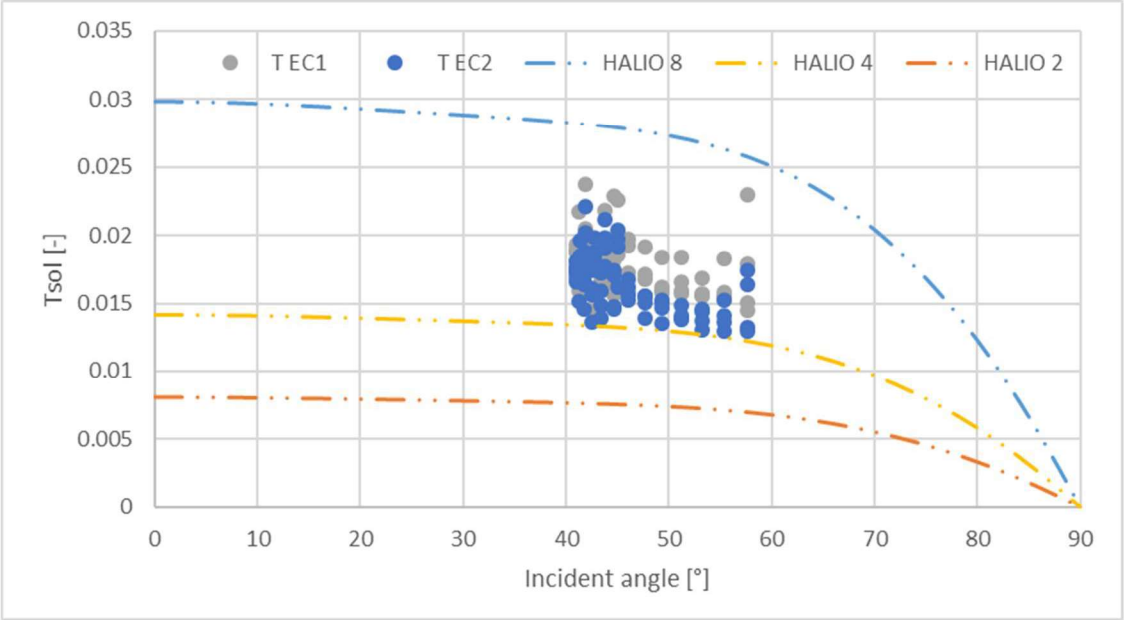

Figura 28 Confronto Tsol sperimentale e simulata, tinted state

Risulta evidente che lo stato più scuro dei vetri elettrocromici non segua nessuno degli stati caratterizzati in Tabella 6; per questo motivo è stato creato un ulteriore stato, tra HALIO 4 e HALIO 8, in modo da caratterizzare al meglio lo stato più scuro degli elettrocromici. L'andamento angolare della Tsol del nuovo stato creato, denominato HALIO 5, è riportato qui di seguito.

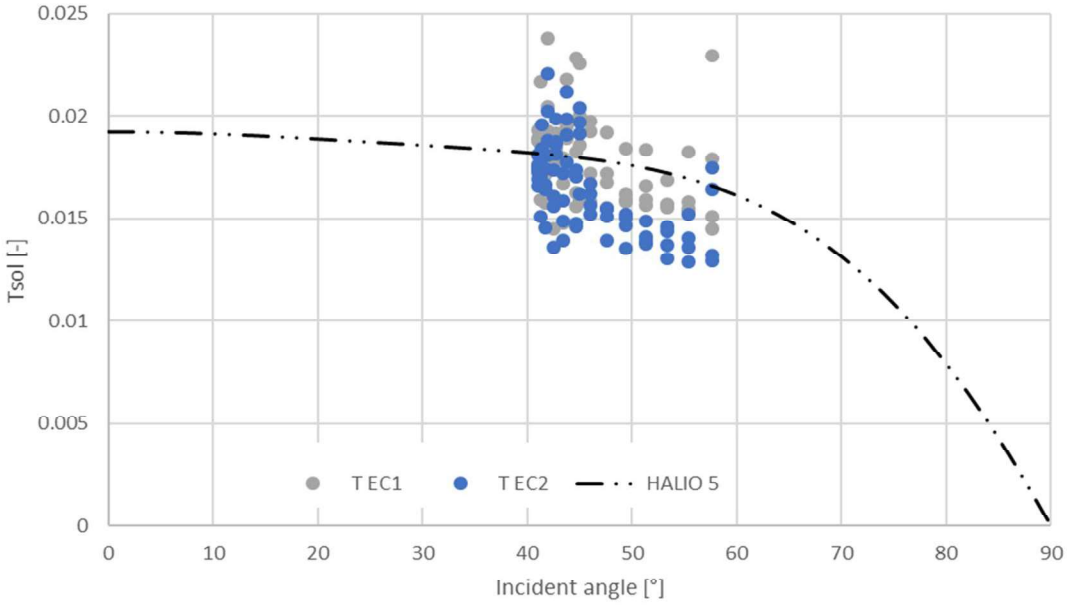

Figura 29 Caratterizzazione tinted state

HALIO 5	Tvis(0°) [-]	Rfvis(0°) [-]	Rbvis(0°) [-]	Tsol(0°) [-]	Rfsol(0°) [-]	Rbsol(0°) [-]	g [-]	U [W/m²K]
Layer elettrocromico	0.050	0.059	0.071	0.021	0.129	0.118	-	-
Componente	0.045	0.055	0.107	0.017	0.123	0.290	0.156	1.20

Figura 30 Proprietà ottiche di HALIO5

3.4 Blower door

Per una caratterizzazione globale della cella si è operato il blower door test che permette di misurare l'ermeticità della cella di prova e valutarne il tasso di ricambi d'ora. Durante la prova sono stati presi in considerazione i 2 Metodi descritti dalla norma [35]: il Metodo A corrisponde al periodo in cui l'impianto di climatizzazione della cella è acceso, mentre il Metodo B descrive bene il periodo in cui l'impianto è spento.

Figura 31 Blower door test

È stato montato il ventilatore nel telaio della porta di accesso alla cella, così come indicato in Figura 31. Prima della prova sono stati sigillati i fori passacavo per il collegamento delle termocoppie esterne al Datataker, in modo che la differenza di pressione misurata tra interno ed esterno della cella sia dovuta solo alla portata d'aria che attraversa il ventilatore.

Per ognuna della 2 condizioni è stata svolta sia la prova in pressione che la prova in depressione; poiché il ventilatore non è in grado di invertire il flusso di aria, per la prova di depressione si è invertito fisicamente il ventilatore in modo che la direzione del flusso d'aria fosse dall'interno all'esterno della cella. Sono state eseguite dapprima le misurazioni per il Metodo A e dopo aver sigillato tutte le aperture esterne sono state eseguite le misure per il Metodo B.

3.4.1 Metodo A

Durante il test, si è provveduto a modificare il numero dei fori tappati e la velocità di rotazione del ventilatore per avere un vasto range di variazione di pressione. I dati raccolti sono riassunti in Tabella 8:

Test in pressione			Test in depressione		
Δp room [Pa]	Δp fan [Pa]	PH	Δp room [Pa]	Δp fan [Pa]	PH
14	64	7	14	65	7
20	135	7	20	160	7
26	220	7	24	180	7
28	105	6	20	65	6
34	130	6	26	106	6
40	155	6	34	145	6
42	52	4	40	170	6
50	70	4	30	60	4
60	85	4	40	80	4
50	40	0	50	105	4
60	50	0	60	140	4

Tabella 8 Misure blower door Metodo A

Utilizzando la formula (2.3), è stata calcolata poi la portata d'aria in funzione della differenza di pressione misurata a monte e a valle del ventilatore:

Test in pressione				Test in depressione			
Δp room [Pa]	Δp fan [Pa]	PH	Q [m³/h]	Δp room [Pa]	Δp fan [Pa]	PH	Q [m³/h]
14	64	7	273.8	14	65	7	275.7
20	135	7	387.6	20	160	7	419.6
26	220	7	486.7	24	180	7	443.2
28	105	6	546.0	20	65	6	436.3
34	130	6	603.4	26	106	6	548.5
40	155	6	655.2	34	145	6	635.1
42	52	4	759.1	40	170	6	684.1
50	70	4	880.0	30	60	4	815.1
60	85	4	969.1	40	80	4	940.4
50	40	0	905.3	50	105	4	1076.4
60	50	0	1014.4	60	140	4	1241.9

Tabella 9 Elaborazione dati Blower door Metodo A

Rappresentando graficamente l'andamento della portata in funzione della differenza di pressione della cella, si ricavano le curve di tendenza; è stato applicato il metodo dei minimi quadrati utilizzando una funzione di potenza, con esponente pari a 0.67.

Le equazioni delle linee di tendenza trovate sono:

Test in pressione

$$Q_{Pa} = 61.04 \cdot (\Delta p_{room})^{0.67} \quad (3.5)$$

Test in depressione

$$Q_{Pa} = 69.72 \cdot (\Delta p_{room})^{0.67} \quad (3.6)$$

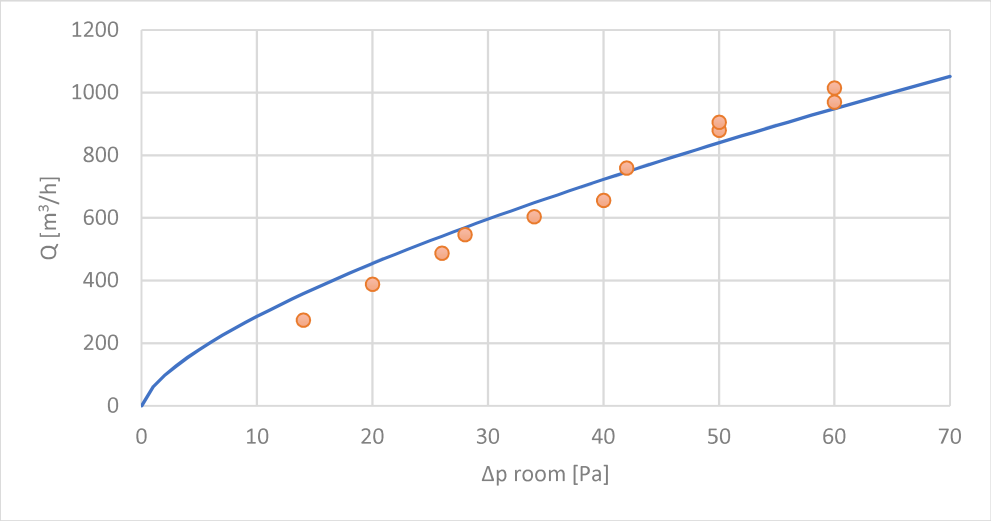

Figura 32 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo A, test in pressione

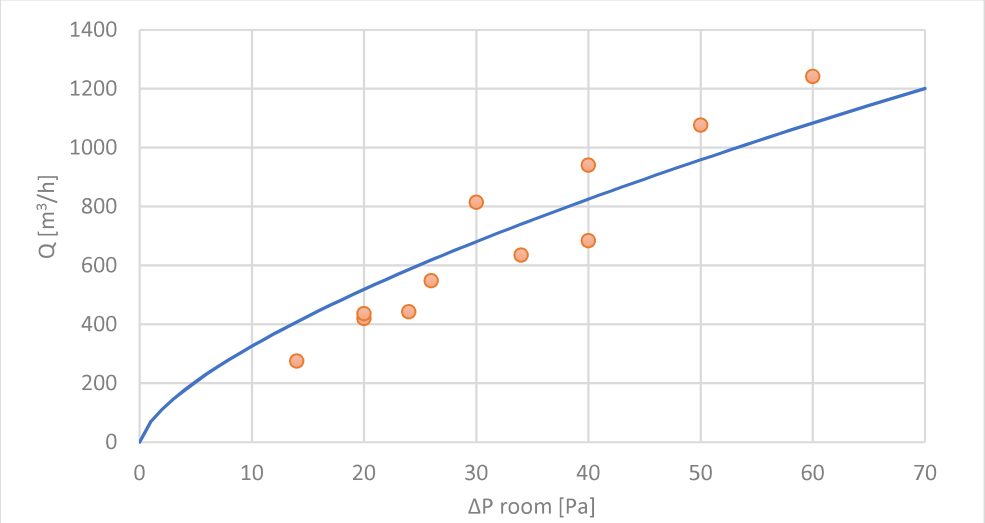

Figura 33 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo A, test in depressione

3.4.2 Metodo B

Terminate le misure per il Metodo A, sono state sigillate con del materiale plastico le bocchette di mandata e le griglie della ripresa dell'impianto di condizionamento ad aria. Sono stati ripetuti tutti i passaggi descritti per il Metodo A e per brevità vengono riportati i risultati finali ottenuti:

Test in pressione				Test in depressione			
Δp room [Pa]	Δp fan [Pa]	PH	Q [m³/h]	Δp room [Pa]	Δp fan [Pa]	PH	Q [m³/h]
20	48	7	239.4	22	67	7	279.7
26	75	7	294.8	30	95	7	329.1
32	98	7	333.9	36	120	7	366.9
36	42	6	355.6	32	65	6	436.3
42	60	6	420.2	42	85	6	494.6
50	72	6	457.6	50	114	6	567.4
42	23	4	506.1	46	65	4	848.2
50	25	4	527.5	52	76	4	916.7
60	30	4	577.6	60	95	4	1024.2
54	20	0	635.7	55	70	0	1204.3

Tabella 10 Elaborazione dati Metodo B

Le equazioni delle linee di tendenza trovate sono:

Test in pressione

$$Q_{Pa} = 36.80 \cdot (\Delta p_{room})^{0.67} \quad (3.7)$$

Test in depressione

$$Q_{Pa} = 50.78 \cdot (\Delta p_{room})^{0.67} \quad (3.8)$$

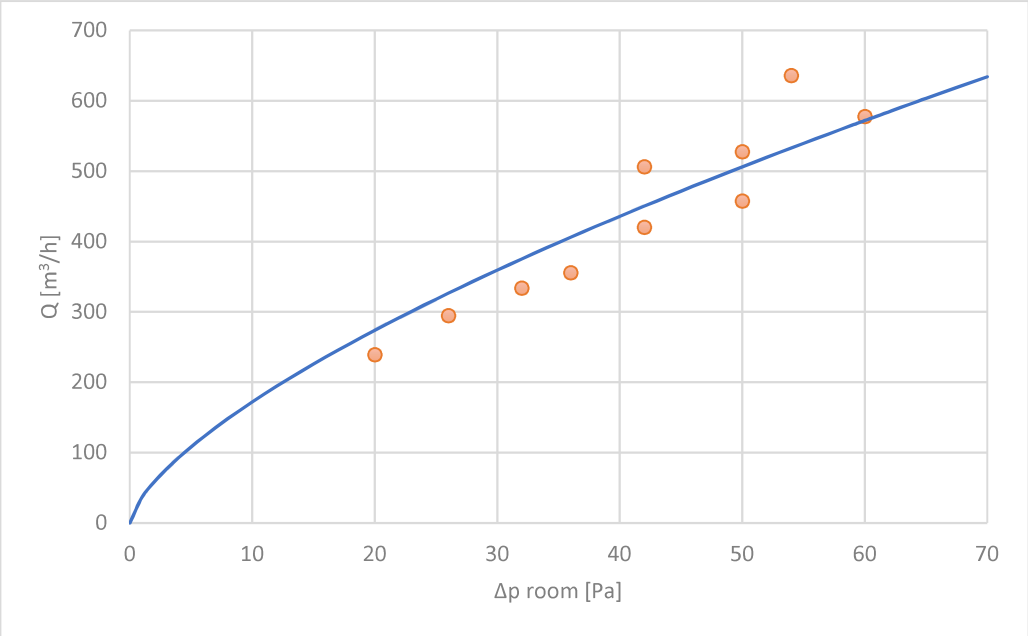

Figura 34 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo B, test in pressione

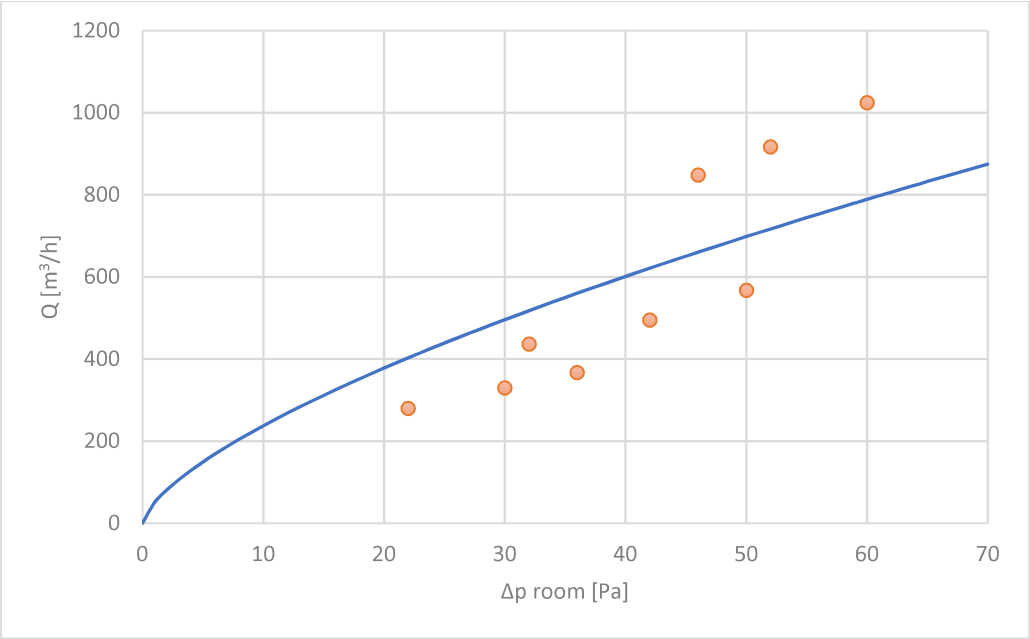

Figura 35 Andamento della portata di aria in funzione della Δp room. Metodo B, test in depressione

3.4.3 Stima dei ricambi d'ora (ACH)

Tramite le formule (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), è possibile quindi calcolare Q_{50}, ovvero la portata di aria quando la differenza di pressione della cella è pari a 50 Pa; applicando poi la legge empirica (2.5), è possibile stimare i numeri dei ricambi d'ora (ACH) dovuti alla ventilazione della cella:

	Test	Q_{50} [m³/h]	n_{50} [h⁻¹]	n_{avg} [h⁻¹]
Metodo A	Test in pressione	839.3	49.30099	2.5
	Test in depressione	958.7	56.31461	2.8
Metodo B	Test in pressione	506.1	29.72862	1.5
	Test in depressione	698.2	41.01269	2.1

Tabella 11 Valori derivati del Blower door test

I valori dei ricambi d'ora sono abbastanza elevati (soprattutto quelli del metodo A) dovuti essenzialmente alla presenza di crepe e dei fori passacavo che diminuiscono l'ermeticità della cella.

4. Modello simulativo e calibrazione sperimentale

In questo capitolo viene descritto il processo di calibrazione del modello della cella su EnergyPlus attraverso il confronto dei dati misurati sperimentalmente con quelli stimati dal modello stesso.

4.1 Modello EnergyPlus

È stato creato il modello della cella su EnergyPlus v 8.9, inserendo tutte le informazioni inizialmente disponibili. Nei modelli white-box è necessario rappresentare al meglio l'edificio in esame, descrivendo minuziosamente caratteristiche e dimensioni effettive dei componenti. È stato quindi creato lo schema grafico 3D della cella di prova su SketchUp andando a definire le dimensioni effettive della cella e a caratterizzare l'ambiente circostante; in particolare è stata inserita l'ostruzione laterale per tenere conto dell'ombreggiamento causato da quest'ultima sulla facciata esposta a Ovest. In Figura 36 è riportato lo schema geometrico della cella.

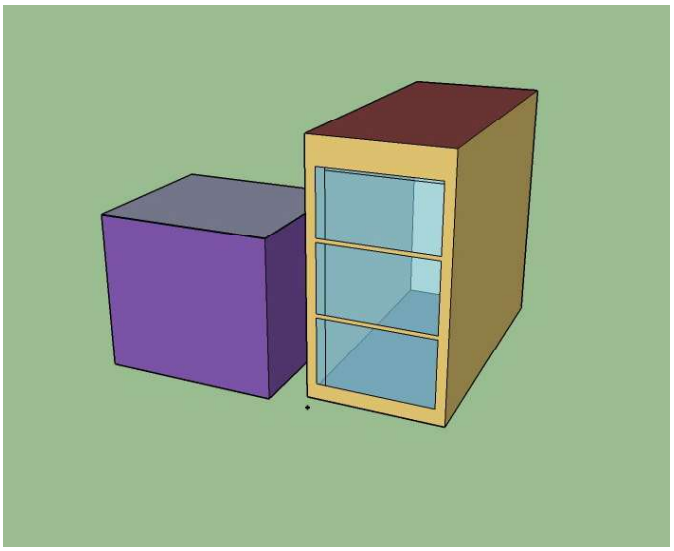

Figura 36 Schema grafico 3D cella

Importato il modello geometrico su EnergyPlus, si è proceduto a inserire le stratigrafie dei componenti. Analizzando gli articoli di ricerca inerenti le TWINS, è stato notato che non si conoscevano le stratigrafie dettagliate dei componenti ma solo i materiali di cui erano costituiti. Partendo dunque dai valori di trasmittanza termica ricavati durante la caratterizzazione dell'opaco (0) e ricavando le proprietà termiche dei materiali in questione dall'ASHRAE 2005 [44] sono state così create le stratigrafie dei componenti opachi:

	Materiale	s [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/KgK]
Interno				0.13		
1	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
2	Poliuretano espanso	0.046	0.024	1.92	50	1250
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno				0.04		
Componente opaco			s [m]		U [W/m²K]	
Muri perimetrali			0.048		0.48	

Tabella 12 Stratigrafia muri perimetrali

	Materiale	s [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/KgK]
Interno				0.17		
1	Linoleum	0.005	0.11	4.55E-02	1300	1900
2	Poliuretano espanso	0.040	0.035	1.14	1250	50
3	Acciaio	0.010	52	1.92E-04	7800	500
Esterno				0.04		
Componente opaco			s [m]		U [W/m²K]	
Pavimento			0.055		0.70	

Tabella 13 Stratigrafia pavimento

	Materiale	s [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/KgK]
Interno				0.10		
1	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
2	Poliuretano espanso	0.046	0.024	1.92	50	1250
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno				0.04		
Componente opaco			s [m]		U [W/m²K]	
Soffitto			0.048		0.48	

Tabella 14 Stratigrafia soffitto

Le proprietà termo-ottiche dei vetri sono state importate da WINDOW 7.6 [45]; in particolare, sono state create le stratigrafie delle finestre e poi i vari *Object* sono stati esportati in formato .idf e importati facilmente su EnergyPlus. Per gli elettrocromici sono stati considerati 7 stati intermedi, descritti al 3.2.2.

È stato inserito poi il valore dei ricambi d'ora ricavati tramite la Blower Door nell'Object *ZoneInfiltration:DesignFlowRate* che richiede l'inserimento della portata di progetto espresso in ricambi d'aria all'ora [h^{-1}]. Poiché durante tutta la campagna di misure l'impianto di climatizzazione della cella non funzionava, sono stati considerati solo i valori della prova nelle condizioni sigillato (pari a ACH=1.5 h^{-1}).

Si è deciso di concentrare i contributi dei ponti termici nella facciata Sud della cella e di creare quindi un materiale che avesse una trasmittanza fittizia U* per tenere conto degli effetti causati da tutti i ponti termici della cella. Dall'analisi della cella sono stati rilevati i seguenti ponti termici:

- Giunzioni finestra-telaio;
- Spigoli interni della cella;
- Spigoli esteri dovuti alla struttura metallica;

Per ognuna delle tipologie di ponte termico è stata valutata la trasmittanza termica lineare ψ e la rispettiva lunghezza l in modo da creare un unico parametro fittizio:

$$C^* = \frac{A_f U_f + \psi_g l_g + \psi_i l_i}{A_f} \tag{4.1}$$

Per il valore di trasmittanza del telaio U_f è stato scelto il valore utilizzato per l'alluminio senza trattamento termico, pari a 6 W/m²K, per la trasmittanza termica lineare vetro-telaio e spigoli, rispettivamente indicati con ψ_g e ψ_i, sono stati scelti i valori 0.05 e 0.5 W/mK. La conduttanza fittizia è quindi pari a $C^* = 16.6$ W/m²K, un valore elevato ma molto prevedibile data la natura fittizia del parametro considerato. Si è poi calcolato il valore della trasmittanza termica fittizia secondo la (2.1), considerando i coefficienti liminari di Tabella 1:

$$U^* = 4.7 \frac{W}{m^2 K} \tag{4.2}$$

Per la facciata Sud è stato utilizzato l'Object *Material:NoMass* in modo da non considerare l'inerzia termica del componente ma solo il contributo dei ponti termici. È stato utilizzato tale espediente anche per andare a semplificare il processo della calibrazione, perché raccogliendo in un unico fattore tutti i ponti termici della cella è possibile fare un'analisi parametrica per scegliere il valore che meglio descrive tale comportamento.

Per il plexiglass è stato invece utilizzato l'oggetto *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*, che permette di caratterizzare un componente vetrato tramite i valori di U-value, g-value e Tvis, considerando solo i valori medi e non quelli spettrali. È stato utilizzato tale espediente per andare a semplificare il processo della calibrazione: non conoscendo le proprietà del Plexiglas infatti si sono dovute fare delle prove per tentativi ed errori; descrivendo il componente con sole 3 proprietà ha agevolato sicuramente il processo iterativo.

U [W/m²K]	g [-]	Tvis [-]
3	0.8	0.7

Tabella 15 Proprietà termo-ottiche plexiglass-Modello BASE

4.2 Calibrazione sperimentale

Per la calibrazione del modello è stato utilizzato il metodo empirico per tentativi ed errori descritto al paragrafo 2.9. In particolare, si è scelto di calibrare il modello rispetto alla temperatura dell'aria interna perché poi tale parametro sarà scelto per l'implementazione delle strategie di controllo avanzate. Il modello inoltre è stato calibrato nelle sole condizioni di *free-running* poiché durante il periodo in cui sono state svolte le prove sperimentali l'impianto della TWINS non funzionava. Il modello è stato dapprima validato sul modello con i vetri impostati nella massima trasparenza (HALIO 73) e poi è stato verificato che i parametri di validazione fossero confermati anche con lo stato di massima colorazione (HALIO 5).

4.2.1 Schema sensori

In Figura 37 è riportato lo schema dei sensori utilizzati per la calibrazione; per la misura dei parametri dei vetri è stata utilizzata invece la stessa sensoristica utilizzata per la caratterizzazione, indicata in Figura 16. In totale sono stati utilizzati 29 sensori:

- 3 termocoppie per la misura della temperatura dell'aria interna;
- 1 termocoppia per la misura della temperatura dell'aria esterna;
- 13 termocoppie per la misura della temperatura superficiale interna;
- 7 termocoppie per la misura della temperatura superficiale esterna;
- 5 piranometri

In particolare, per la misura della temperatura superficiale interna del pavimento sono state utilizzate 3 termocoppie, mentre per il soffitto e per le pareti Est e Ovest sono state utilizzate 2 termocoppie; è stato utilizzato tale accorgimento perché durante l'arco del giorno tali componenti venivano in parte colpiti dalla radiazione solare per cui è stato considerato il valore medio delle misure. Il Datataker acquisisce i dati ogni minuto e fornisce i valori medi ogni 15 minuti.

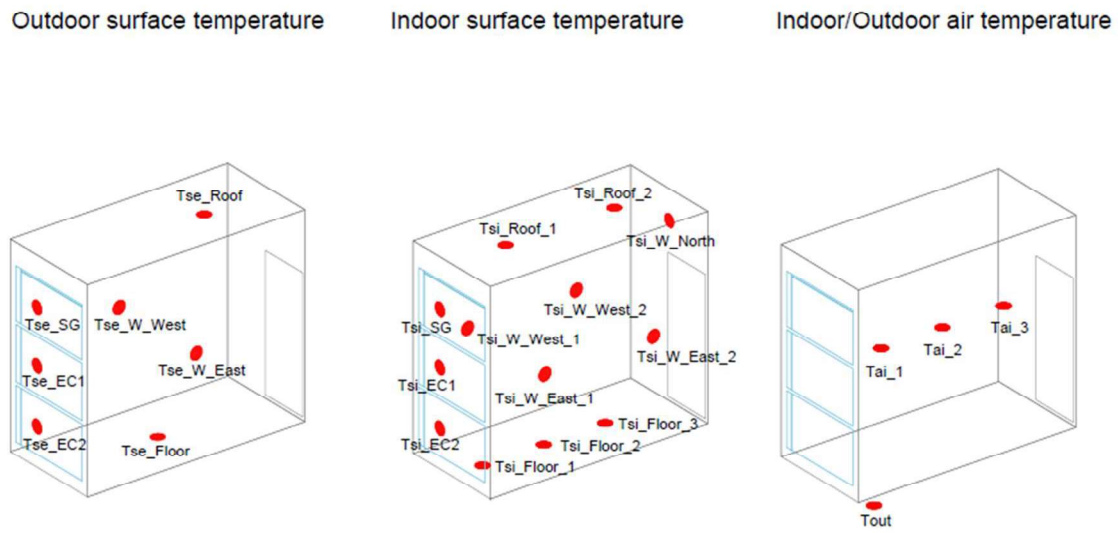

Figura 37 Schema sensori calibrazione

4.3 Clear state

La campagna di misure per la calibrazione della cella con i vetri nello stato chiaro è stata svolta dal 27 Marzo al 2 Aprile 2019. Inizialmente vengono confrontati gli andamenti della radiazione solare incidente la facciata Sud e della radiazione solare trasmessa dai 3 vetri, per verificare l'accuratezza del file climatico considerato:

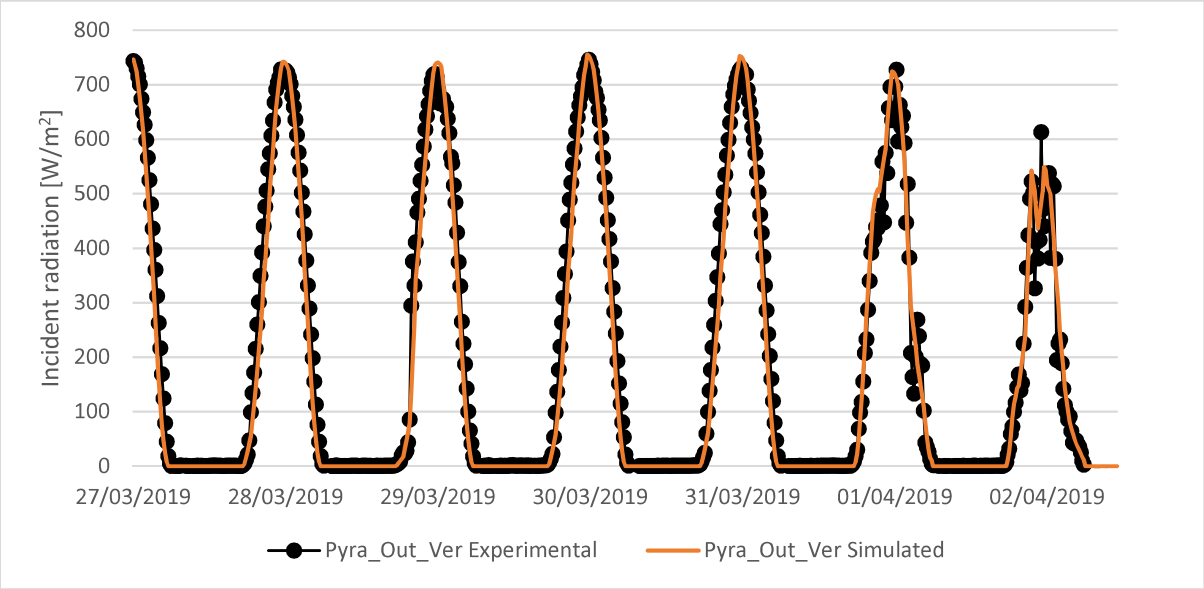

Figura 38 Confronto della radiazione solare incidente facciata SUD

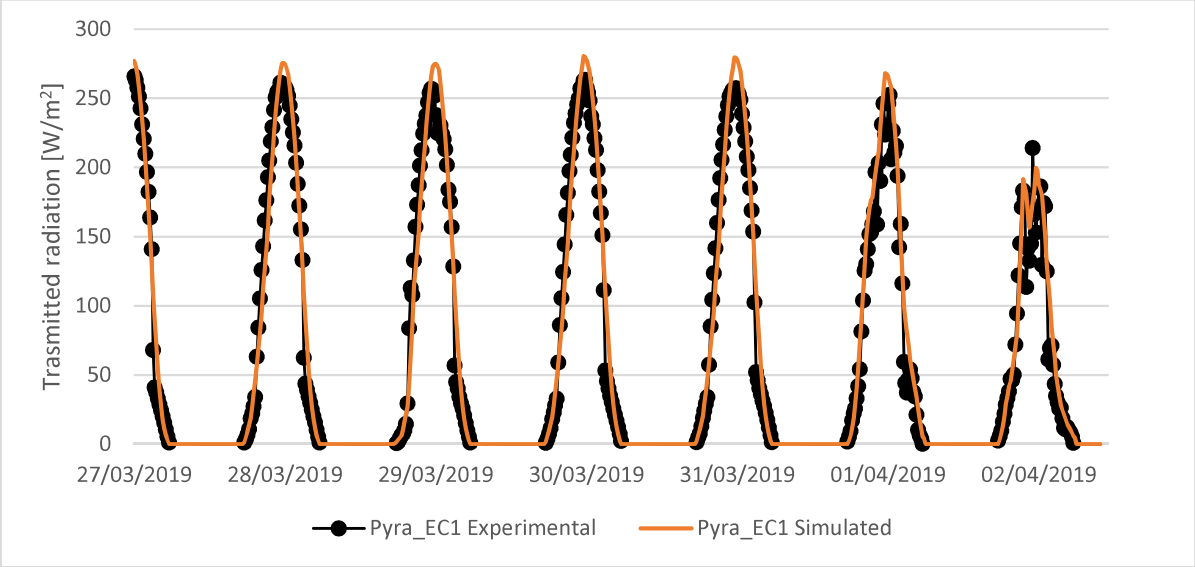

Figura 39 Confronto della radiazione solare trasmessa da EC1

La Figura 38 conferma l'accuratezza del file meteo utilizzato per descrivere le condizioni climatiche durante i giorni di misure; i confronti di Figura 39 forniscono un'ulteriore conferma che lo stato più chiaro corrisponde ad HALIO73.

Verificati che gli apporti solari, si confrontano gli andamenti tra la temperatura misurata e quella stimata dal modello:

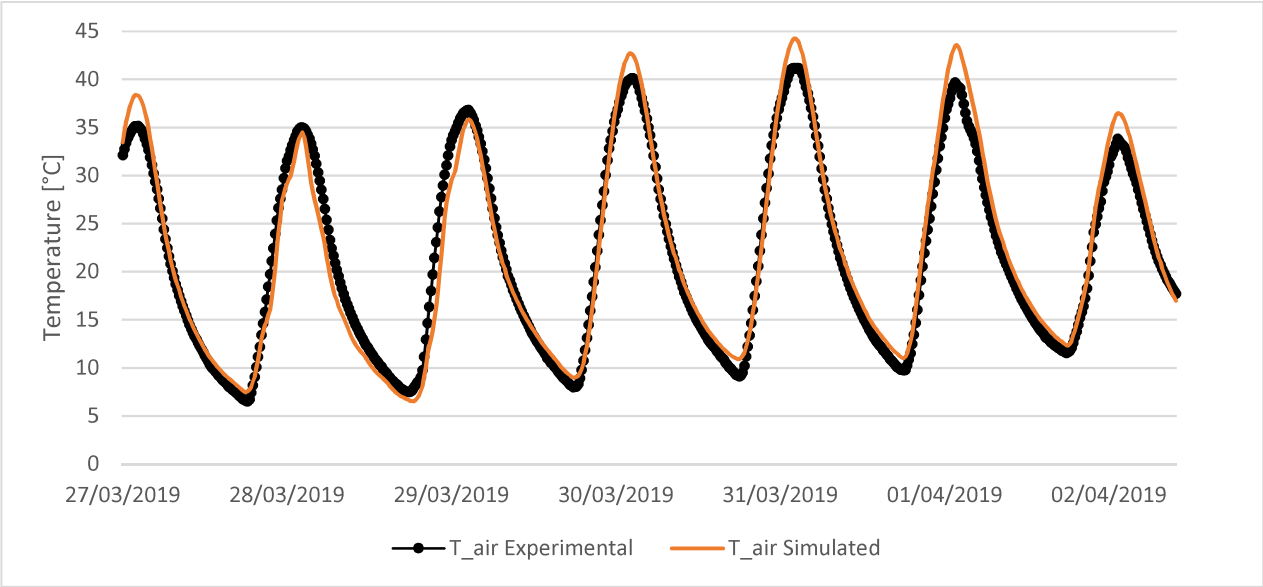

Figura 40 Confronto temperatura media dell'aria interna tra i valori misurati e stimati dal modello BASE

Si può notare come il modello BASE sovrastimi la temperatura durante le ore centrali del giorno, ad eccezione del 28 e 29 Marzo; questo potrebbe essere causato essenzialmente da una sovrastima della quantità di radiazione solare entrante nella cella nelle ore centrali del giorno. Inoltre, c'è un diverso decadimento della temperatura durante le ore notturne, che potrebbe essere causato da un'erronea caratterizzazione degli elementi opachi. Confrontando gli andamenti delle temperature superficiali, è stato rilevato uno strano andamento della temperatura superficiale esterne di tutti i componenti in esame in corrispondenza dei giorni 28 e 29 Marzo; tale anomalia si ripercuote sull'andamento della temperatura superficiale interna dei componenti e quindi sulla temperatura dell'aria. Per brevità si riporta solo il confronto della temperatura superficiale esterna del muro orientato ad Est:

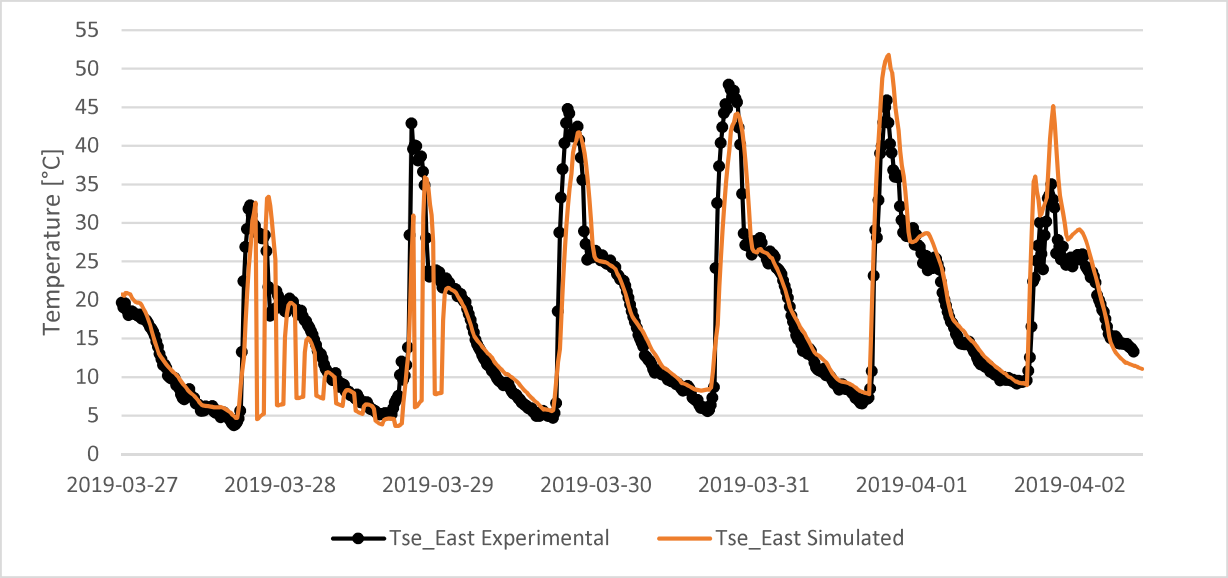

Figura 41 Andamento temperatura superficiale esterna parete Est

Questo andamento anomalo è dovuto essenzialmente al vento: la stazione meteo del Politecnico di Torino è posta in un punto più alto della cella per cui la velocità del vento misurata è maggiore rispetto alla velocità del vento locale della cella e i due giorni in esame erano particolarmente ventosi; per questo si è quindi deciso di non considerare gli effetti del vento perché va ad influenzare molto l'andamento della temperatura.

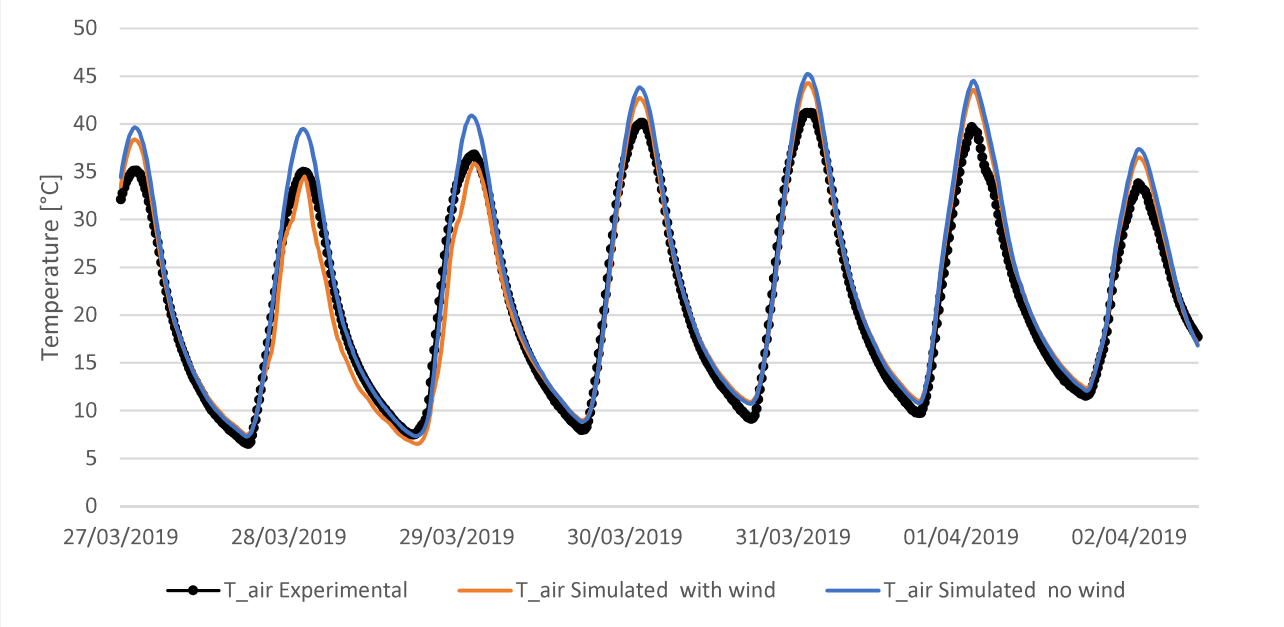

Figura 42 Confronto temperatura interna

Con queste assunzioni, si può notare che il modello sovrastima la temperatura dell'aria interna durante le ore centrali di tutti i giorni presi in esame. Occorre dunque ridurre gli apporti solari entranti nella cella; per fare ciò si è deciso di intervenire inizialmente sul Plexiglas perché è l'unico componente della cella di cui non si conoscevano le proprietà fisiche. Sono quindi stati ridotti il valore della g-value e del coefficiente di trasmissione nello spettro del visibile al fine di diminuire gli apporti solari trasmessi; a partire dai valori utilizzati nel modello BASE sono state svolte diverse simulazioni al variare dei valori di g-value e Tvis (considerati uguali per semplicità di calibrazione) nel modo seguente:

	U [W/m²K]	g-value [-]	Tvis [-]
BASE	3	0.8	0.7
PLEX05	3	0.5	0.5
PLEX03	3	0.3	0.3

Tabella 16 Parametri calibrazione Plexiglas

In Figura 43 è possibile vedere gli andamenti della temperatura interna al variare delle condizioni descritte nella Tabella 16. È chiaro che il contributo del Plexiglas non è predominante sul valore della temperatura, data la sua piccola superficie (circa 0.3 m²); per valori di g-value minori di 0.5 non si riscontrano poi evidenti differenze sul valore della temperatura dell'aria

interna. Per questo motivo si è ritenuto utilizzare per il Plexiglas le proprietà descritte in Tabella 16 con PLEX05.

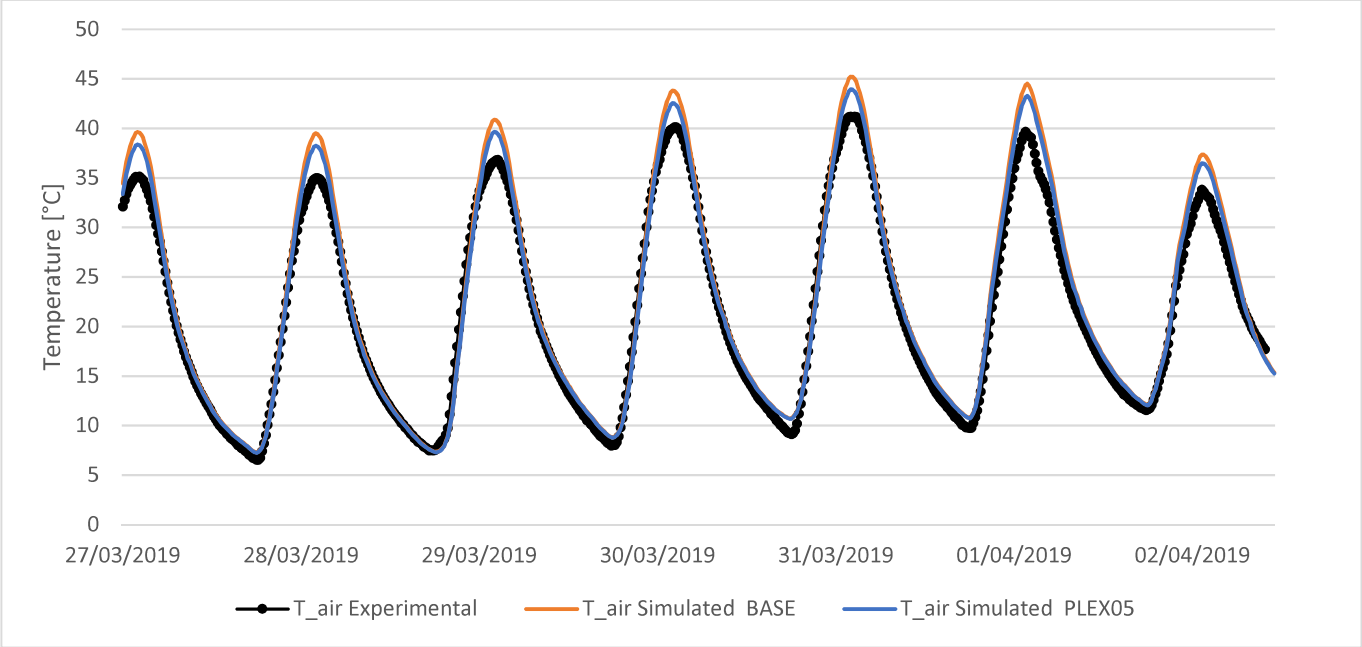

Figura 43 Confronto temperatura aria interna in funzione delle proprietà ottiche del plexiglass

Per ridurre gli apporti solari, è stato modificato il coefficiente di assorbimento solare α delle pareti; nel modello base era stato utilizzato il valore di default di EnergyPlus, pari a 0.7, per tutti i componenti opachi. A partire quindi dal modello base, sono state svolte alcune simulazioni in cui è stato diminuito il coefficiente di assorbimento delle pareti. In Figura 44 sono riportati per una più chiara comprensione grafica, solo gli output dello stato di partenza (WALL 0.7) e di quello finale (WALL 0.5), messi a confronto con i valori misurati.

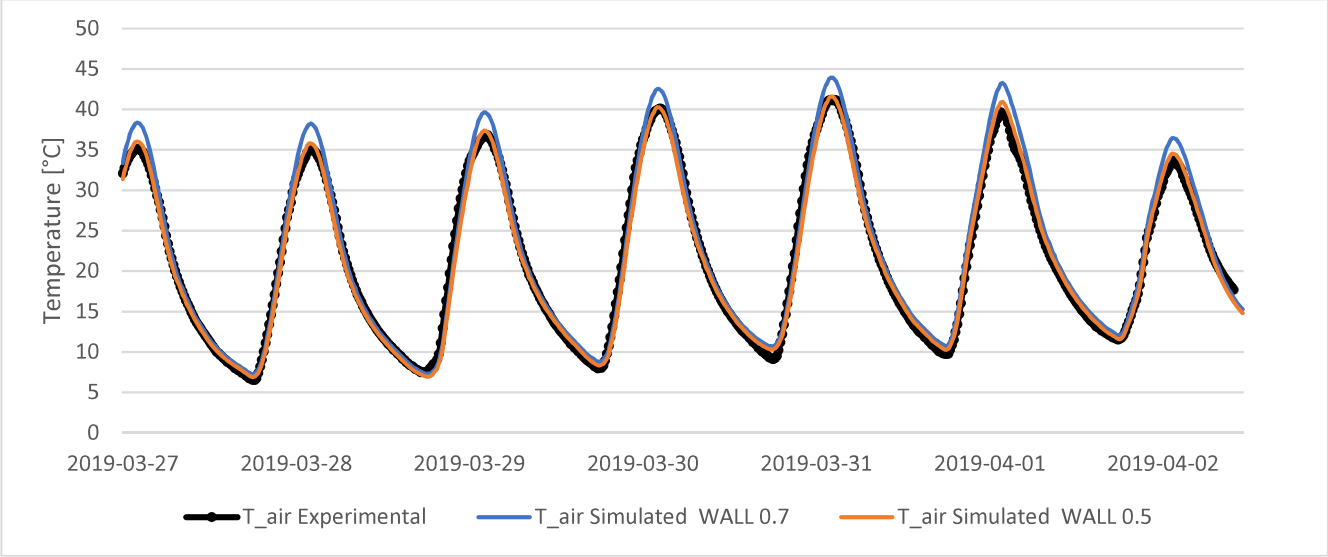

Figura 44 Confronto temperatura in funzione del coefficiente di assorbimento solare delle pareti

In Figura 45 è riportato l'andamento della temperatura del pavimento simulata da EnergyPlus (FLOOR05); si può notare che durante le ore centrali del giorno si hanno delle evidenti differenze di temperatura mentre durante le ore notturne il decadimento della curva ha un andamento diverso rispetto al valore misurato. Sembra infatti che il pavimento abbia una diversa costante di tempo, dovuta all'inerzia termica del componente. Per tale motivo quindi si è proceduto a cambiare il coefficiente di assorbimento α del linoleum e ad aumentare la densità e il calore specifico del poliuretano espanso che costituisce lo strato isolante del pavimento. Per brevità in Figura 45 e in Tabella 17 sono riportati sono l'output finali (FLOOR) in confronto con lo stato di fatto iniziale (FLOOR05).

	α [-]	U [W/m²K]	ρ_{poly} [kg/m³]	C_{poly} [J/kgK]
FLOOR05	0.5	0.70	50	1250
FLOOR	0.2	0.70	500	2000

Tabella 17 Parametri per la caratterizzazione pavimento

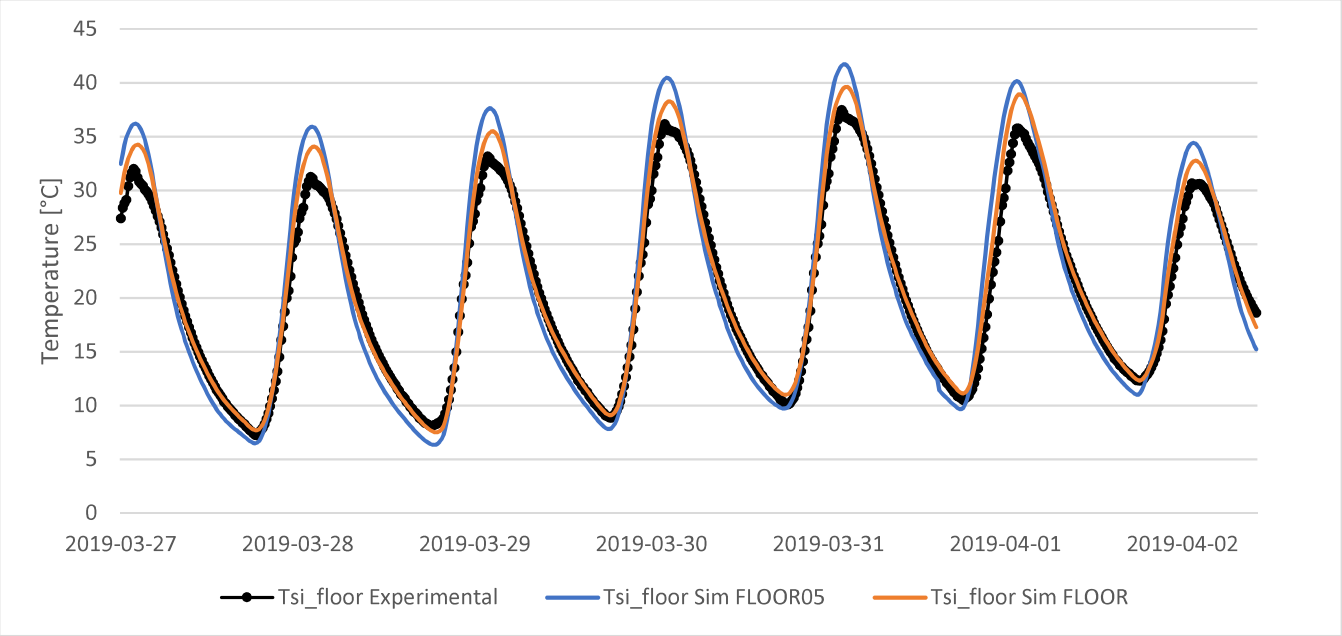

Figura 45 Confronto temperatura superficiale interna del pavimento

Un ragionamento analogo è stato svolto sul soffitto, in cui è stato aumentato a 0.7 il coefficiente di assorbimento dello strato esterno.

Tramite i cambiamenti sopra descritti, è stato creato un modello di EnergyPlus che stima molto bene la temperatura misurata nella cella così come riportato in Figura 46:

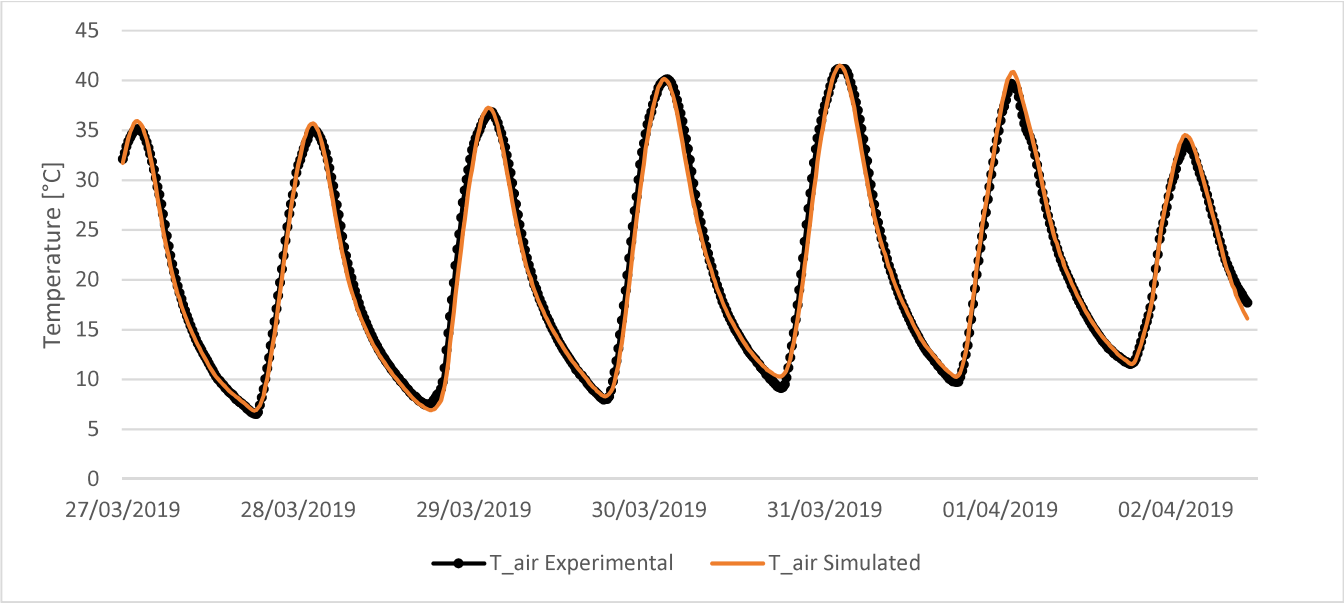

Figura 46 Confronto temperatura aria interna del modello calibrato

Si procede adesso alla validazione del modello tramite la stima dei parametri descritta al paragrafo 2.9.1. In Tabella 18 sono riportati gli indici descritti dalla ASHRAE Guideline 14:2002 [38] con i rispettivi valori limiti prescritti. I due indici statistici rientrano nei limiti imposti dall'ASHRAE per cui il modello Clear è ritenuto validato.

Indice statistico	Modello	Valore limite dati orari
NMBE	-1.3%	±10%
CV(RMSE)	5%	30%

Tabella 18 Parametri statistici validazione del modello Clear

4.4 Tinted state

Calibrato il modello con i vetri impostati nello stato più chiaro, si è proceduto alla verifica dei parametri di validazione del modello con i vetri nello stato più scuro. Sono stati utilizzati i valori misurati in cella per 6 giorni, dal 14 al 19 Marzo 2019; la Figura 47 conferma la validità del file climatico utilizzato, mentre in Figura 48 è riportato il confronto tra la temperatura misurata e stimata dal modello. È evidente che la differenza più rilevante si ha il 17 Marzo, in cui il residuo tra i due parametri supera 1°C; i parametri di validazione sono però rispettati (Tabella 19**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) per cui si ritiene che il modello è validato anche in questo caso.

Indice statistico	Modello	Valore limite dati orari
NMBE	-1.7%	±10%
CV(RMSE)	8%	30%

Tabella 19 Parametri statistici validazione del modello tinted

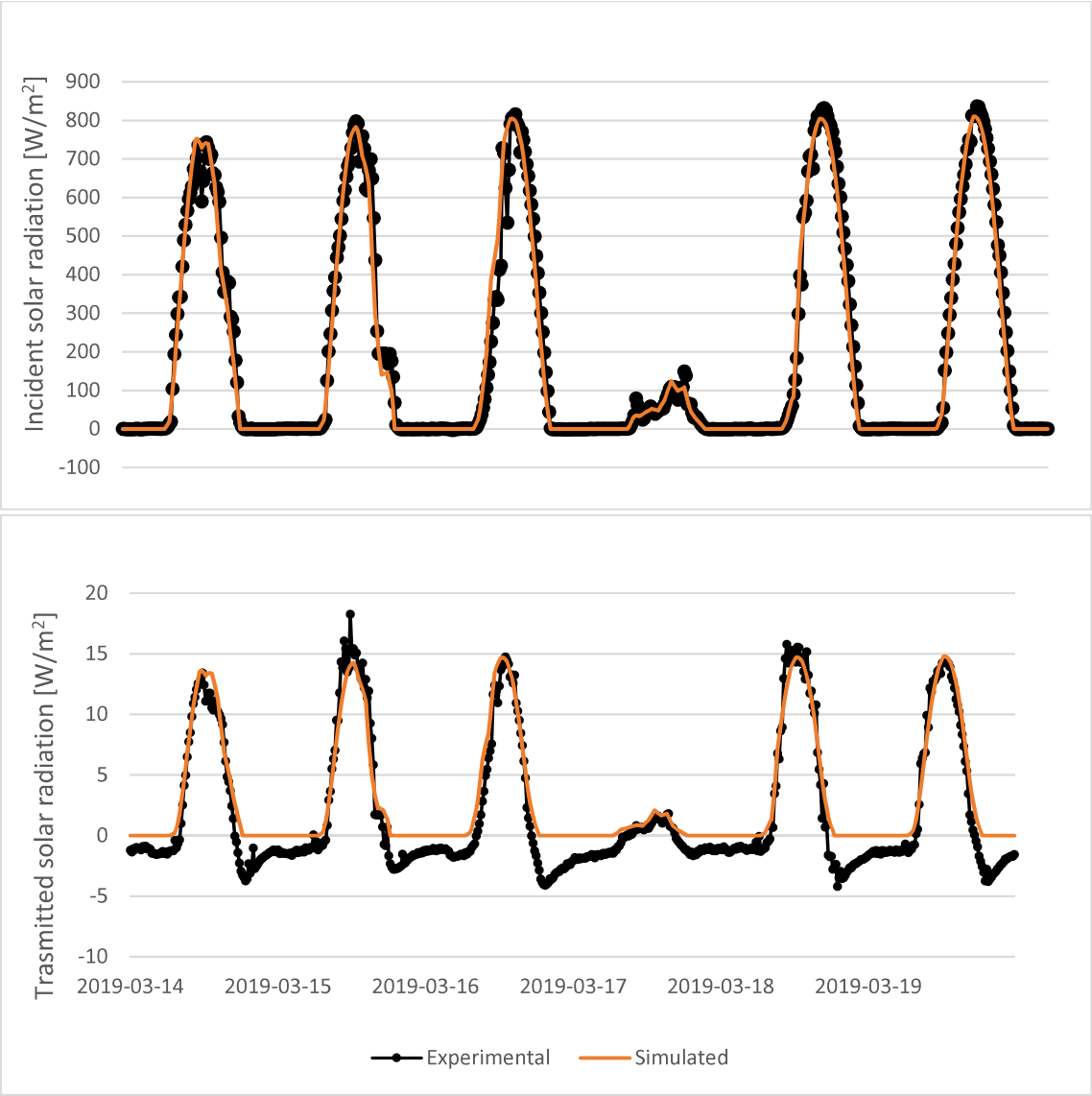

Figura 47 Verifica file climatico tinted state.
Confronto radiazione solare incidente la facciata Sud (in altro) e radiazione solare trasmessa da EC1 (in basso)

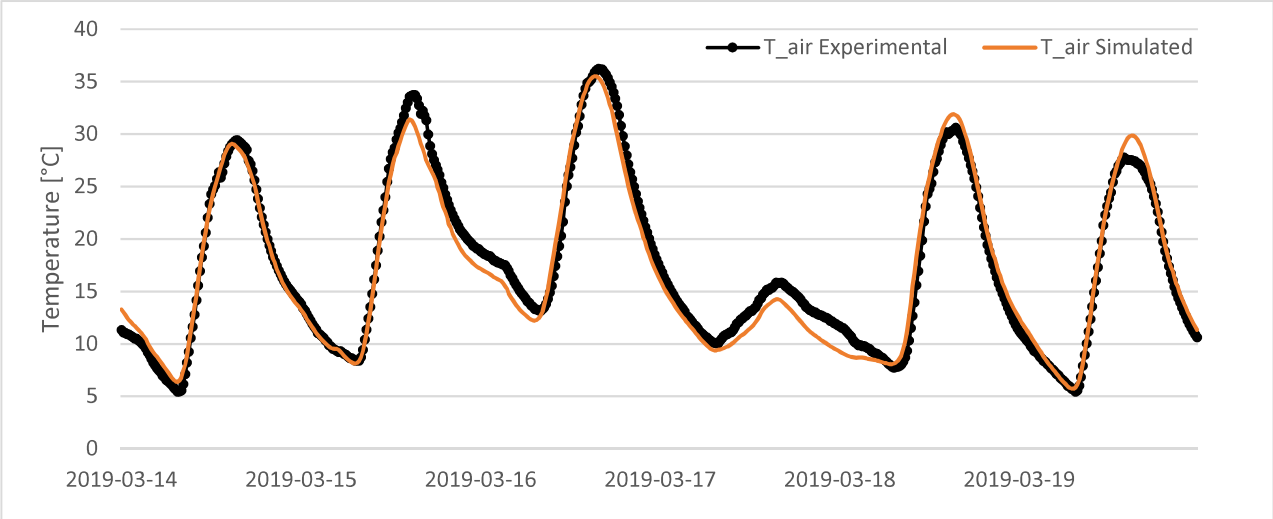

Figura 48 Cofronto temperatura interna, tinted state

4.5 Parametri del modello validato

In questa sezione sono riportate tutte le caratteristiche inserite e/o modificate su EnergyPlus per la validazione del modello. La Figura 49 riassume in modo schematico tutte tutti i parametri fisici del modello validato.

	Materiale	s [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/KgK]
Interno				0.13		
1	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
2	Poliuretano espanso	0.046	0.024	1.92	50	1250
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno				0.04		
Componente opaco			s [m]	U [W/m²K]	α_{in} [-]	α_{out} [-]
Muri perimetrali			0.048	0.48	0.5	0.5

Tabella 20 Stratigrafia dei muri perimetrali modello finale

	Materiale	s [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/KgK]
Interno				0.17		
1	Linoleum	0.005	0.11	4.55E-02	1900	1300
2	Poliuretano espanso	0.04	0.035	1.14	500	2000
3	Acciaio	0.01	52	1.92E-04	7800	500
Esterno				0.04		
Componente opaco			s [m]	U [W/m²K]	α_{in} [-]	α_{out} [-]
Pavimento			0.055	0.70	0.2	0.7

Tabella 21 Stratigrafia del pavimento modello finale

	Materiale	s [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]]	c [J/KgK]
Interno				0.10		
1	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
2	Poliuretano espanso	0.046	0.024	1.92	50	1250
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno				0.04		
Componente opaco			s [m]	U [W/m²K]	α_{in} [-]	α_{out} [-]
Soffitto			0.048	0.48	0.5	0.7

Tabella 22 Stratigrafia soffitto modello finale

Componente opaco	s [m]	U [W/m²K]	α_{in} [-]	α_{out} [-]
Telaio vetri	0.048	4.7	0.2	0.2
Porta	0.048	0.53	0.5	0.5

Tabella 23 Parametri componenti opachi modello finale

Componente trasparente	U [W/m²K]	g-value [-]	Tvis [-]
Plexiglass	3	0.5	0.5

Tabella 24 Parametri plexiglass modello finale

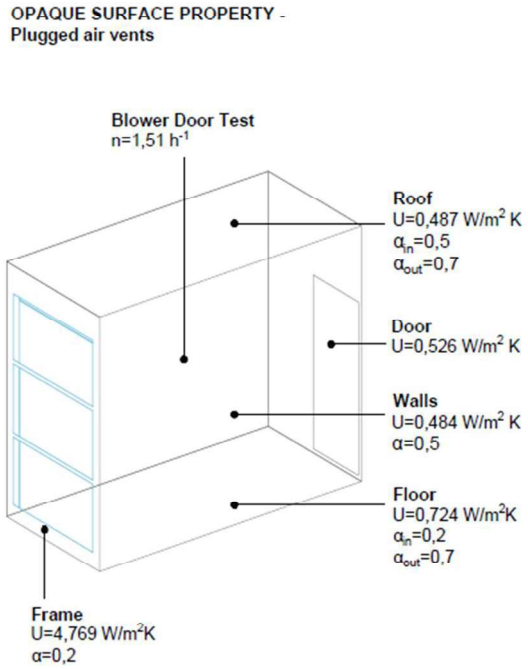

Figura 49 Schematizzazione dei parametri del modello validato

5. Riduzione del modello

Nel presente capitolo vengono descritti i passaggi metodologici e le assunzioni fatte per la costruzione di un modello ridotto in grado di descrivere al meglio l'andamento della temperatura all'interno della cella di prova al variare delle condizioni a contorno (temperatura esterna, radiazione solare, energia fornita o sottratta dall'impianto di condizionamento) (vedi paragrafo 2.10).

5.1 Dati

Per la costruzione del modello ridotto è necessario utilizzare dati (misurati o simulati) che descrivano il comportamento del sistema oggetto di studio in diverse condizioni a contorno. In questo caso, i dati sono frutto di campagne simulative effettuate su un modello calibrato costruito su EnergyPlus e utilizzando il file climatico standard di Torino. L'utilizzo del modello simulativo calibrato permette di avere dati relativi ad un intero anno di esercizio della cella di prova in tempi ristretti, pur mantenendo un buon livello di affidabilità se comparato con quello di dati ottenuti sperimentalmente. Per l'identificazione del sistema sono state considerate 3 settimane diverse dell'anno, che corrispondono a 3 condizioni climatiche tra loro differenti e rappresentative sia di situazioni estreme che di condizioni intermedie:

1. Una settimana invernale (con sistema di condizionamento in modalità *heating*);
2. Una settimana di mezza stagione (con sistema in *free-running*);
3. Una settimana estiva (con sistema in modalità *cooling*).

In questo modo il sistema ridotto sarà in grado di stimare la temperatura dell'aria interna in tutte le diverse condizioni dell'anno.

Sono stati creati 2 tipi di *data frame*: il primo contenente i dati relativi alle 3 settimane sopra descritte, che verranno utilizzati dal tool di R per stimare i parametri concentrati del modello ridotto (STIMA); il secondo contenente i dati delle settimane immediatamente successive alle precedenti, utilizzati per testare il modello ridotto avente i parametri concentrati precedentemente stimati (TEST). In Tabella 25 sono indicati i giorni dell'anno che corrispondo ai 2 diversi data frame:

	STIMA	TEST
Heating	15/01 - 21/01	22/01 - 28/01
Free-running	9/04 - 15/04	16/04 - 22/04
Cooling	9/07 - 15/07	16/07 - 22/07

Tabella 25 Identificazione data frame

I data frame così scelti coprono un'ampia gamma di condizioni a contorno che possono presentarsi nell'edificio da identificare; di conseguenza, il modello ridotto sarà poi in grado di descrive il sistema fisico in modo accurato anche in periodi dell'anno diversi da quelli utilizzati per la stima e per il test.

Le due variabili del modello che possono essere controllate sono lo stato del vetro e la potenza termica dell'impianto. Al fine di allenare il modello ridotto con la più ampia varietà di stati delle variabili controllate, sono state create due tipologie di *Schedule*: una *Schedule* di tipo regolare, caratterizzata da cambiamenti regolari ogni 6 ore, e una *Schedule* di tipo impulsiva, caratterizzata da cambiamenti randomici che avvengono ogni ora. Sono state create 2 *Schedule*: una per impostare lo stato del vetro e un'altra per modulare la potenza richiesta dall'impianto. In particolare, durante i primi 4 giorni il tipo di schedule utilizzata per lo stato del vetro è opposta a quella dell'impianto (una regolare e una impulsiva per i primi 2 giorni e l'inverso per gli altri 2), mentre negli ultimi 3 giorni le schedule sono entrambe impulsive. In Figura 50 sono rappresentate le schedule fornite come input ad EnergyPlus durante le 3 settimane stabilite. Si può notare, ad esempio nel caso invernale, che i primi 2 giorni la *Schedule* dei vetri è di tipo regolare (lo stato del vetro viene modificato ogni 6 ore) mentre la *Schedul*e dell'impianto è di tipo impulsivo con cambiamenti randomici orari; la situazione è stata invertita durante i successivi due giorni, e viene ancora modificata in modo da avere schedule impulsive in entrambi i casi durante gli ultimi 3 giorni della settimana.

Per quanto riguarda l'impianto, sono stati scelti dei valori randomici compresi tra 0 e 1 kW durante la stagione invernale e tra -1 e 0 kW durante la stagione estiva. Per la stagione intermedia si è invece scelta la situazione di *free-running* (impianto spento) in modo da poter allenare il sistema anche in queste condizioni. L'impianto che immette o sottrae energia all'ambiente simulato su EnergyPlus, è stato semplificato con l'Object *OtherEquipment* presente nella categoria *Internal Gains*; l'impianto è quindi considerato come un'apparecchiatura elettrica che immette o sottrae un certo quantitativo di potenza termica all'ambiente. Il valore assoluto della potenza immessa/sottratta dipende dalla *Schedule,* fornita come input; la potenza è stata impostata completamente convettiva per meglio simulare un impianto a tutt'aria. In questo è stato possibile fornire ad EnergyPlus direttamente la potenza da erogare, piuttosto che la classica temperatura di set-point da mantenere nell'ambiente interno, che non consente alcun controllo sulla potenza immessa/sottratta dall'impianto.

Il controllo dei vetri è stato effettuato considerando i seguenti stati:

Stato EC	Stato HALIO
1	HALIO 73
2	HALIO 60
3	HALIO 46
4	HALIO 28
5	HALIO 5

Tabella 26 Stati dei vetri elettrocromici

Nella *Schedule* regolare invernale si è fatto in modo che, durante le ore del giorno, i vetri fossero nei due stati più chiari (Stato 1 e 2), mentre per la *Schedule* estiva si sono scelti gli stati più scuri (Stati 4 e 5). In questo modo si è tenuto contro delle condizioni usualmente utilizzate per modulare la radiazione solare nelle due stagioni. Per l'implementazione del controllo dei vetri su EnergyPlus è stato utilizzato l'Energy Management System (EMS): un programma

appositamente creato consente di cambiare lo stato dei vetri in funzione del valore della *Schedule* di controllo, considerata da EnergyPlus come *sensore*; è stato impostato il Model Calling Point su *BeginTimestepBeforPredictor*, in modo da cambiare lo stato dei vetri all'inizio di ogni timestep, prima del calcolo dei valori di output del programma.

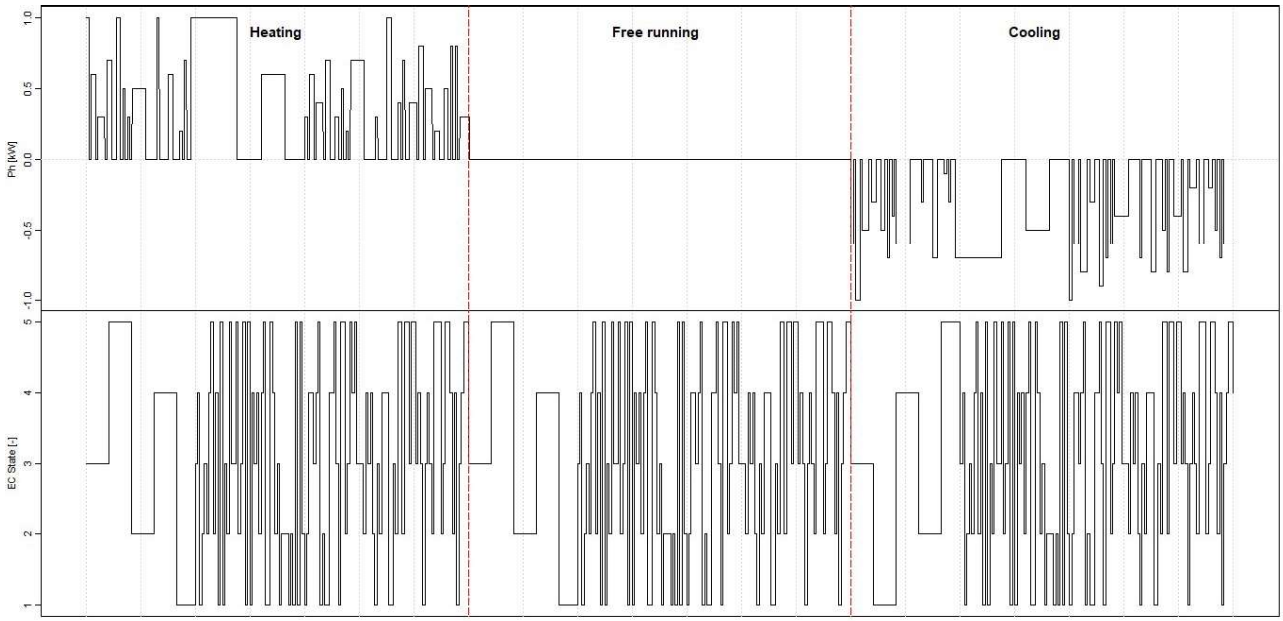

Figura 50 Schedule impianto e stato del vetro

5.2 Identificazione del modello

Il modello ridotto viene rappresentato sotto forma di circuito RC, che rende possibile l'analogia con i fenomeni di scambio termico che avvengono nell'ambiente reale. Per approcciare il problema, sono stati elencati i principali processi di scambio termico che caratterizzano il sistema:

- Trasmissione attraverso i componenti di involucro opaco;
- Apporti solari entranti in cella attraverso i componenti trasparenti e opachi;
- Accumulo termico dell'ambiente interno;
- Accumulo termico nei componenti d'involucro;
- Scambi dovuti alle infiltrazioni di aria;
- Apporti (positivi o negativi) legati all'impianto;

Appare chiaro quindi che lo schema di Figura 14 non sia adatto a descrivere tutti i processi termici che avvengono nella cella, ma si ha bisogno di un sistema a 2 stati, di cui uno è la temperatura interna dell'aria. Dopo un'analisi dei diversi modelli presenti in [15], si è deciso di tnere in considerazione la capacità termica dell'involucro (Ce); di conseguenza, l'involucro verrà descritto con 2 resistenze e una capacità, e la temperatura dell'involucro (Te) risulterà essere un nodo. Il modello finale scelto è quello mostrato in Figura 52; in un primo momento si era scelto il modello che tenesse conto anche delle infiltrazioni, con una resistenza R_v in

parallelo alle resistenze R_i in modo da collegare il nodo della temperatura dell'aria interna con la temperatura dell'aria esterna (Figura 51). Attraverso successive simulazioni e l'analisi dei report finali, il modello considerato risultava *over-parametrized* e l'unico parametro che non rispettava i vincoli descritti al punto 2.9.2 era proprio la resistenza di ventilazione R_v.

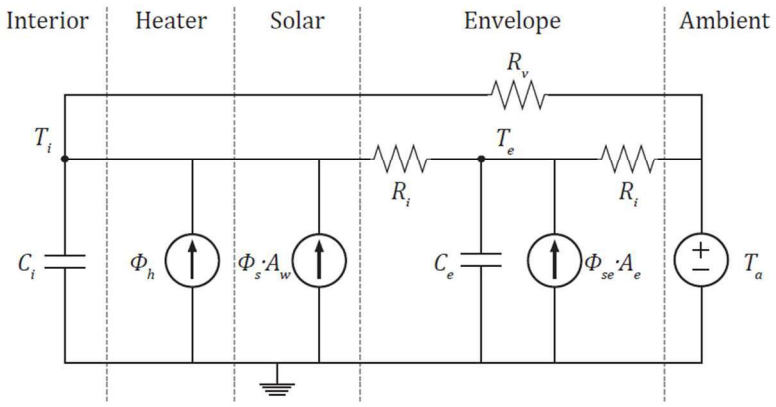

Figura 51 Modello RC con resistenza di ventilazione

Per cui si è scelto di eliminare tale parametro e considerare il seguente modello:

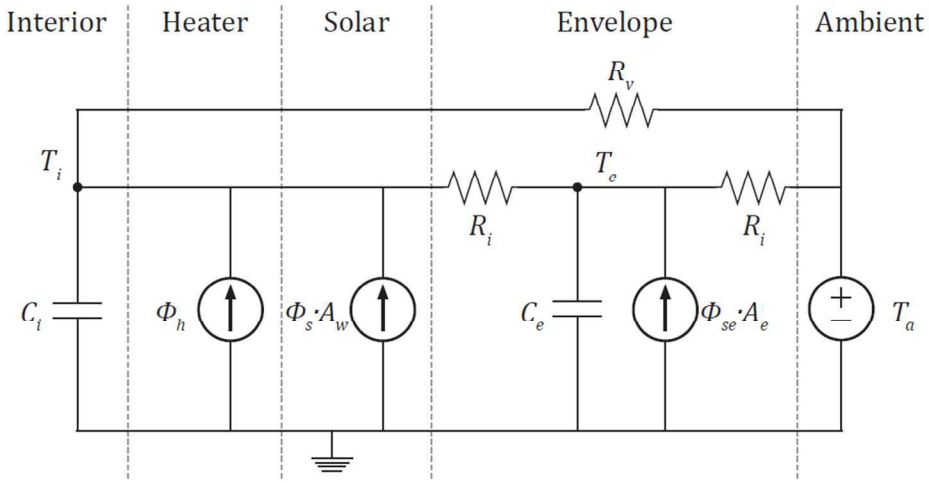

Figura 52 Modello RC finale

Il modello è quindi a 2 variabili di stato descritto dalle seguenti equazioni differenziali stocastiche:

$$\frac{dTi}{dt} = \frac{1}{RiC_i}(T_e - T_i) + \frac{1}{C_i}\phi_s A_w + \frac{1}{C_i}\phi_h$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{1}{RiC_e}(T_i - T_e) + \frac{1}{R_i C_e}(T_a - T_e) + \frac{1}{C_e}\phi_{se} A_e \tag{5.1}$$

Il sistema (5.1) può essere descritto in modo compatto nella seguente forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_i}{dt} \\ \frac{dT_e}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_i C_i}\right) & \frac{1}{R_i C_i} \\ \frac{1}{R_i C_e} & -\frac{2}{R_i C_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_i \\ T_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{A_w}{C_i} & 0 & \frac{1}{C_i} \\ \frac{1}{R_i C_e} & 0 & \frac{A_e}{C_e} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_a \\ \phi_s \\ \phi_{se} \\ \phi_h \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Equivalente all'equazione matriciale

$$dT = A \cdot T + B \cdot I \tag{5.3}$$

I parametri del sistema sono:

R_i è la resistenza termica equivalente che tiene conto di tutti gli involucri opachi e le rispettive aree del sistema [K/kW];

C_i è la capacità termica equivalente dell'ambiente interno [kWh/K],

C_e è la capacità termica equivalente di tutti gli involucri opachi [kWh/K];

A_w è l'area vetrata effettiva [m²];

A_e è l'area della superficie opaca illuminata dal sole [m²];

Gli input del sistema sono:

T_a è la temperatura dell'aria esterna [°C];

ϕ_s è la radiazione solare trasmessa attraverso i componenti vetrati [kW/m²];

ϕ_{se} è la radiazione solare globale [kW/m²];

ϕ_h è la potenza dell'impianto di condizionamento [kW];

Gli output del sistema sono invece:

T_a è la temperatura interna dell'aria [°C];

T_e è la temperatura del componente opaco equivalente [°C];

T_e è una temperatura fittizia che nasce dall'esigenza di considerare la capacità termica (e dunque l'inerzia termica) dei componenti opachi.

I dataframe contengono quindi le seguenti grandezze:

- yTi Temperatura dell'aria interna della cella simulata [°C];
- Ta Temperatura dell'aria esterna [°C];
- ϕ_s Radiazione solare trasmessa attraverso le finestre [W/m²];
- ϕ_{se} Radiazione solare globale [W/m²];
- ϕ_h Potenza erogata dall'impianto di climatizzazione [W];

Per la stima dei parametri, il modello ha infatti bisogno di conoscere il valore della temperatura media dell'aria interna della cella in funzione degli input endogeni ed esogeni. I dati sono forniti al minuto, ricavati dalla simulazione annuale di EnergyPlus.

In particolare, per il calcolo della radiazione solare trasmessa attraverso la finestra ϕ_{sw}, è stata considerata la radiazione solare indicente la facciata Sud moltiplicata per il valore del coefficiente solare g di tutto il sistema finestrato:

$$\phi_{sw} = \phi_{SUD} \cdot g^* \tag{5.4}$$

g^* è la media ponderata dei singoli g-value dei 3 elementi trasparenti sulla rispettiva superficie, i cui valori sono riportati in Tabella 27 in funzione dello stato del vetro assunto:

$$g^* = \frac{\sum_i g_i A_i}{A_{w,tot}} \tag{5.5}$$

L'utilizzo di questa grandezza ha permesso la formulazione del modello RC continuo, collegando lo stato del vetro alla grandezza di input; in alternativa si sarebbe dovuto utilizzare un modello RC discreto, mediante l'utilizzo di diverse matrici B in funzione dello stato del vetro assunto. Svincolando il valore del coefficiente solare g dalla matrice dei parametri B, è possibile quindi ottenere un modello ridotto continuo e in fase avanzate di controllo questo permetterà anche la scelta di stati elettrocromici intermedi diversi dai 5 stati utilizzati per l'identificazione del modello.

Stato	Stato HALIO	g* [-]
1	HALIO 73	0.468
2	HALIO 60	0.405
3	HALIO 46	0.342
4	HALIO 28	0.275
5	HALIO 5	0.207

Tabella 27 g-value dell'intero sistema vetrato

EnergyPlus non fornisce tra gli output il valore della radiazione solare globale, ma solo la componente diretta e diffusa; quindi è stato implementato un programma sull'EMS in grado di calcolare ad ogni timestep il valore della radiazione solare globale a partire dai valori di radiazione solare diretta ϕ_{dir}, della radiazione solare diffusa ϕ_{diff} e dell'altezza solare δ - inseriti tutti come sensori – tramite la relazione:

$$\phi_{se} = \phi_{diff} + \phi_{dir} \cos \delta \tag{5.6}$$

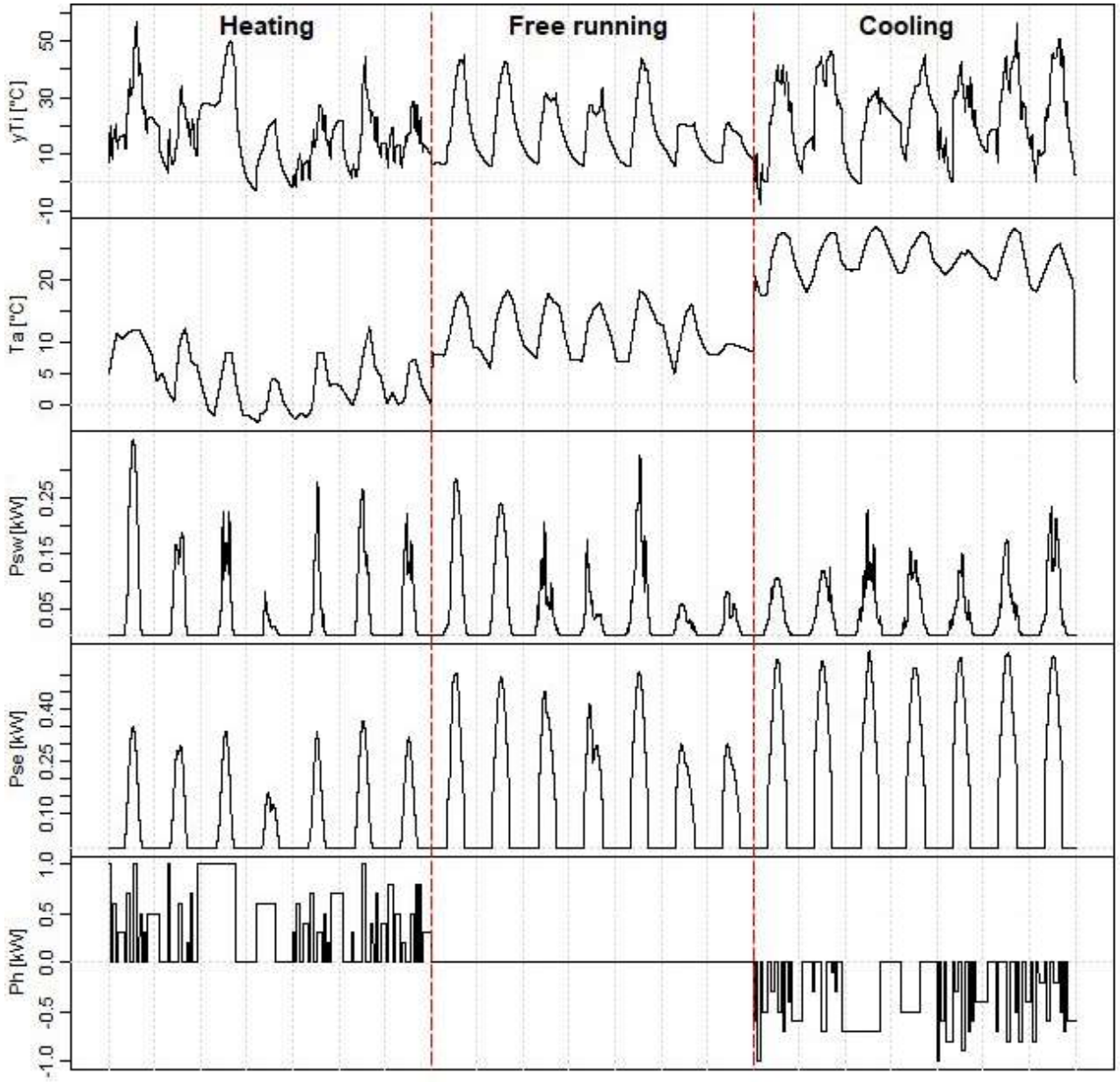

Figura 53 Dati input data frame STIMA

5.3 Stima dei parametri concentrati

Per la stima dei parametri concentrati, il tool ha bisogno di un valore iniziale di stima e un range entro cui il parametro può variare; la stima dei valori iniziali è svolta tenendo conto del significato fisico di ogni parametro.

- R_i [K/kW]

Per il calcolo del valore iniziale della resistenza termica dell'involucro edilizio si è tenuto conto della trasmittanza termica equivalente:

$$U_{eq} = \frac{\sum_i U_i A_i}{A_{tot}} \tag{5.7}$$

Dall'analisi delle stratigrafie di tutti gli elementi d'involucro opaco si evince che si ha una simmetria dei vari layer, con lo strato di isolamento centrale e i 2 stati esterni in acciaio; per tale motivo si è deciso di imporre uguali le 2 resistenze termiche:

$$R_i = \frac{1}{2}\frac{1}{U_{eq}A_{tot}} \tag{5.8}$$

- C_e [kWh/K]

A partire dalle stratigrafie dei componenti opachi, si è trovata la capacità termica totale:

$$C_e = \frac{\sum_i c_i A_i}{3600} \tag{5.9}$$

In cui c_i è la capacità termica del singolo componente opaco, calcolata secondo la seguente formula:

$$c_i = \sum_j \rho_j c_j s_j \tag{5.10}$$

In cui

ρ_j è la densità del materiale dello strato j-esimo [kg/m^3];

c_j è la capacità termica specifica dello strato j-esimo [J/kgK];

s_j è lo spessore dello strato j-esimo [m];

c_i è espressa in [J/ m^{2}K].

- C_i [kWh/K]

Per il calcolo della capacità termica dell'aria interna è stata utilizzata la seguente formula:

$$C_i = \gamma \cdot V \cdot \frac{\rho_{air} c_{air}}{3600} \tag{5.11}$$

In cui

γ è il coefficiente adimensionale che tiene conto del mobilio interno, pari a 3;

V è il volume interno della cella [m^3];

c_{air} è la capacità termica dell'aria, pari a 1005 J/kgK;

ρ_{air} è la densità dell'aria, pari a 1.225 kg/m^3;

- A_w [m^2]

Per il calcolo dell'area effettiva trasparente non si è considerato il Plexiglas ma solo il vetro statico e i due vetri elettrocromici:

$$A_w = A_{SG} + A_{EC1} + A_{EC2} \tag{5.12}$$

- A_e [m^2]

Per il calcolo dell'area opaca illuminata dal sole sono state considerate solo il soffitto e le facciate Est e Ovest perché sono le uniche facciate illuminate direttamente dal sole durante tutto l'anno. Per tenere conto della quota parte di radiazione assorbita dai componenti opachi e poi riemessa in ambiente interno, è stato utilizzato poi il coefficiente di assorbimento esterno α_{out}, i cui valori sono riportati in Tabella 20 Tabella 21 Tabella 22:

$$A_e = A_{EST} \cdot \alpha_{out,WALL} + A_{OVEST} \cdot \alpha_{out,WALL} + A_{SOF} \cdot \alpha_{out,SOF} \tag{5.13}$$

I valori iniziali dei parametri concentrati del modello sono riportati in Tabella 28 oltre al valore massimo e minimo del range. Le relazioni (5.14) sono state utilizzate per la definizione del range di tutti i parametri ad eccezione della A_e; durante la stima ci si è accorti che il tool tendeva a sottostimare tale parametro, poiché la radiazione solare globale è sicuramente maggiore della quantità di radiazione solare che incidente le 3 facciata opache. Si è scelto di utilizzare la radiazione solare globale perché è una grandezza facilmente ricavabile tramite la stazione meteo del Politecnico, in alternativa si sarebbe dovuto utilizzare la radiazione solare indicente le 3 faccia e ciò avrebbe richiesto l'utilizzo di 3 piranometri, uno per ogni facciata. Per cui si è deciso di abbassare il valore minimo di A_e a 2 m^2.

$$\theta_{min} = \frac{\theta_0}{3}$$
$$\theta_{max} = \theta_0 \cdot 3 \tag{5.14}$$

Parametro		Valore stimato	Valori iniziali	Valore minimo	Valore massimo
Ci	[kWh/K]	0.048	0.0174	0.0058	0.052
Ce	[kWh/K]	0.016	0.037	0.0124	0.1117
Ae	[m²]	3.2	16.13	2.00	32.26
Aw	[m²]	0.79	3.16	0.632	9.48
Ri	[K/kW]	14.2	25.95	8.65	77.84

Tabella 28 Definizione del range per la stima dei parametri concentrati

Terminato il processo di stima vengono riportati i seguenti dati:

Parametro		Estimate	Standard Error	p-value	Pr(>|t|)	dF/dPar	dPen/dPar
Ci	[kWh/K]	0.048	5.03E-04	1.00E+02	0.00E+00	-3.09E-05	0.0083
Ce	[kWh/K]	0.016	2.95E-04	6.14E+01	0.00E+00	2.31E-05	-0.0006
Ae	[m²]	3.200	6.00E-02	5.36E+01	0.00E+00	-7.80E-05	-0.0004
Aw	[m²]	0.790	7.48E-02	9.45E+00	0.00E+00	4.73E-05	-0.008
Ri	[K/kW]	14.200	1.36E-01	1.04E+02	0.00E+00	-1.14E-04	-0.0004

Tabella 29 Report dei dati stimati da CTSM-R

	Ti0	Te0	Ae	Aw	Ce	Ci
Te0	0.1					
Ae	0	-0.13				
Aw	0.01	0.15	-0.72			
Ce	-0.01	0.02	0.22	0.08		
Ci	0	0.05	0.08	0.08	-0.03	
Ri	-0.01	-0.05	-0.23	-0.23	-0.69	-0.06

Tabella 30 Matrice di correlazione dei parametri concentrati

Bisogna verificare che il modello rispetti i vincoli descritti al paragrafo 2.1.9, in particolare:

- I Pr(>|t|) di tutti i parametri deve essere minore di 0.05;
- La derivata della funzione obiettivo rispetto ad ogni parametro dF/dPar deve essere vicina allo zero;
- La derivata della funzione di penalità rispetto ad ogni parametro deve essere vicina allo zero;
- I valori della matrice di correlazione – ad eccezione dei valori della diagonale – devono essere diversi da ± 1;

Il modello rispetta tutti i vincoli e quindi i parametri scelti descrivono bene gli scambi termici che avvengono nella cella di test.

5.4 Validazione del modello

Vengono riportati quindi gli andamenti degli input, degli output e dei residui stimati sul data frame TEST.

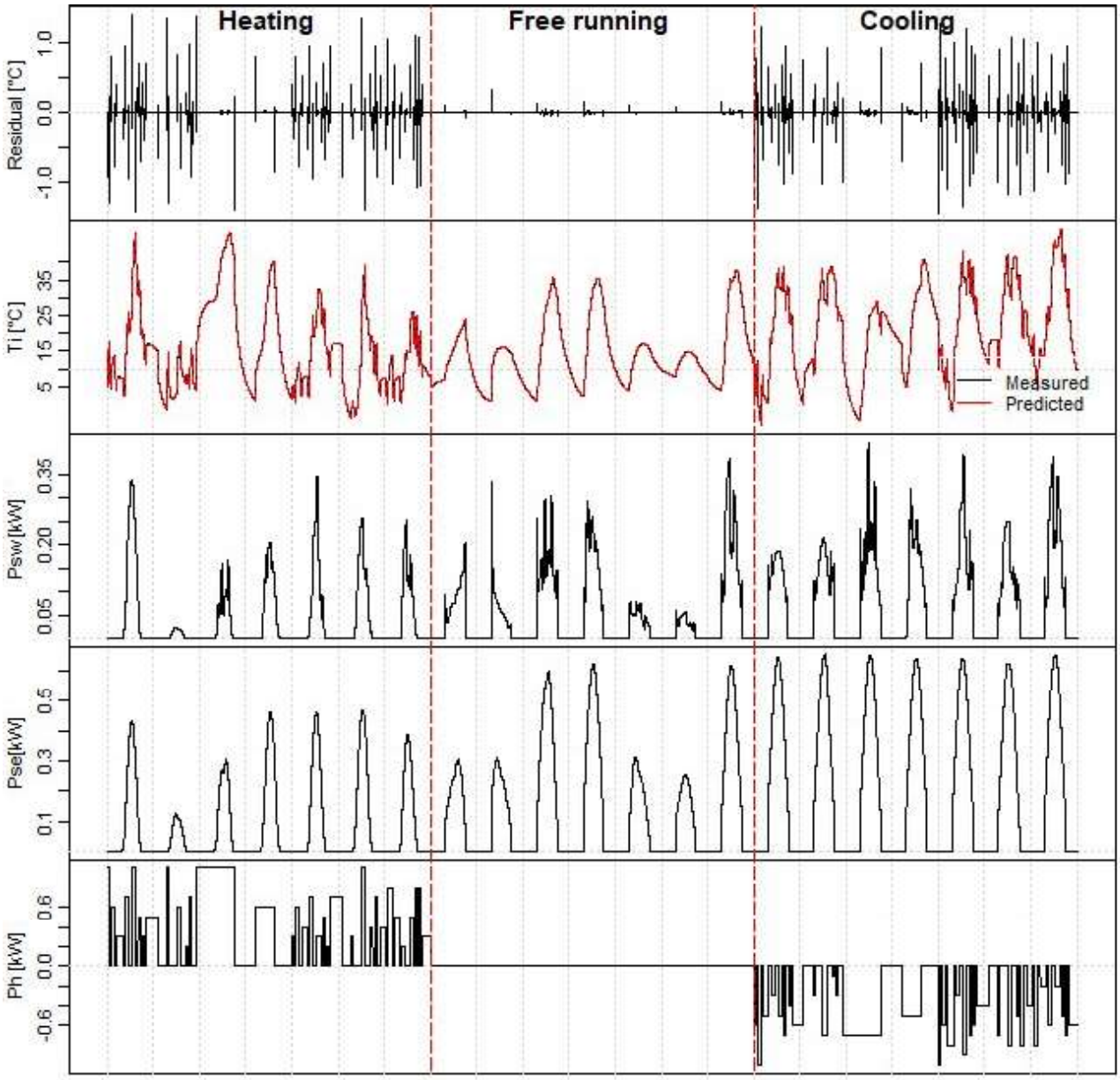

Figura 54 Confronto residuo, input e output, data frame TEST

Il residuo è lo scarto tra il valore misurato e quello stimato dal modello; il modello risponde bene a tutte le variazioni delle condizioni al contorno, escluso i periodi in cui si accende o spegne l'impianto. I picchi dei residui si verificano infatti in corrispondenza dell'accensione e spegnimento dell'impianto e questo è dovuto al fatto che nel modello implementato la *Schedule* fa in modo che in un minuto l'impianto eroghi tutta la potenza; questo nella realtà non si verifica mai ma vi è una variazione graduale di potenza, dovuto all'inerzia termica sia dell'impianto che del sistema. Per provare a risolvere tale problema è stato utilizzato un sistema a 3 stati in cui il terzo stato era appunto la temperatura dell'impianto Th in modo da tenere conto dell'inerzia dell'impianto, ma i residui presentava lo stesso andamento dei picchi del modello a due stati.

Si ritiene quindi che il modello ridotto appena descritto è validato ed è in grado di predire in modo sufficientemente accurato la temperatura dell'aria interna al variare delle condizioni al contorno. C'è da dire infatti che le forzanti esterne del sistema sono abbastanza estremizzate, nel senso che nella realtà non si andrà mai a modulare l'impianto con valori randomici ogni ora ma si avrà un profilo sicuramente più lineare. L'andamento dei residui mostra come il sistema è in grado di ridurre al minimo il residuo al timestep successivo dell'accensione dell'impianto: questo è sicuramente un riscontro positivo sull'accuratezza del modello ridotto e avvalora l'ipotesi secondo cui i picchi dei residui, con valore massimo pari a 1.3°C, sono dovuti alle accensioni randomiche poco ripetibili nella realtà. Nella condizione di *free-running* poi il sistema è in grado di predire in maniere molto accurata la temperatura dell'aria interna; in questo caso il residuo assume valori minori di 0.3 °C, valore molto basso che tra l'altro corrisponde all'errore di misura delle termocoppie.

6. Implementazione di controlli avanzati per i vetri elettrocromici

In questo capitolo vengono analizzati i controlli dei vetri elettrocromici, tutti implementati con l'obiettivo di ridurre la quantità di energia richiesta dall'impianto. Dall'analisi della letteratura risulta che tra tutti i controlli Rule Based, il controllo basato sulla temperatura è il più performante per la riduzione del fabbisogno di energia richiesta dall'impianto. Per cui sono stati implementati 2 sistemi di controllo Rule Based uno basato sulla radiazione solare incidente e l'altro sulla temperatura dell'aria interna. Sono stati poi implementati due controlli Model Based che sfruttano la proprietà predittiva del modello ridotto. Tutti i controlli avvengono ogni 15 minuti, svolti su simulazioni annue. L'obiettivo di questo capitolo è dunque investigare la migliore strategia di controllo in grado di ottenere maggior risparmio energetico.

6.1 Controlli di riferimento

Per confrontare le performance energetiche dei controlli sono stati implementati due controlli di riferimento: Benc1 si riferisce al controllo di riferimento per il vetro statico a massima trasparenza (HALIO73) e Benc2 si riferisce al controllo di riferimento per il vetro statico a massima colorazione (HALIO 5).

6.2 Controllo 1

È un controllo di tipo Rule Based, che dipende dalla quantità di radiazione solare incidente la facciata Sud, secondo i valori soglia indicati in Figura 55. (Il codice per l'implementazione del controllo 1 è disponibile in Allegato IV)

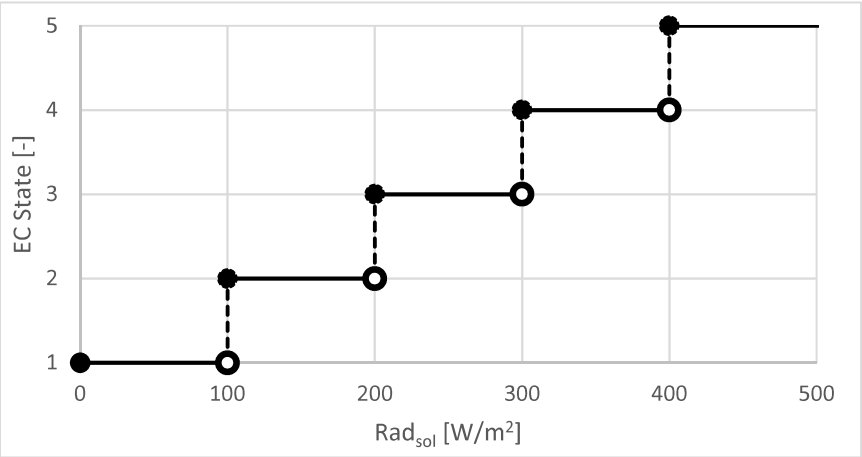

Figura 55 Valori soglia Controllo 1

Le presenti analisi sono riferite rispetto ai risultati ottenuti tramite simulazioni numeriche e quindi la quantità di radiazione solare incidente la facciata Sud è stata inserita tra gli output di EnergyPlus. Per il controllo in real-time, tale valore sarà invece misurato dal piranometro esterno della facciata esterna. La Figura 56 mostra il carpet plot dello stato dei vetri

elettrocromici scelto dall'algoritmo per tutto l'anno. Poiché lo stato del vetro dipende in modo lineare dalla quantità di radiazione incidente, risulta evidente che il controllo cambia lo stato del vetro solo nelle ore centrali del giorno. Si individuano solo dei pattern caratteristici in funzione del giorno e non della stagionalità, con cambiamenti minimi sulla durata dei controlli tra i mesi estivi e quelli invernali.

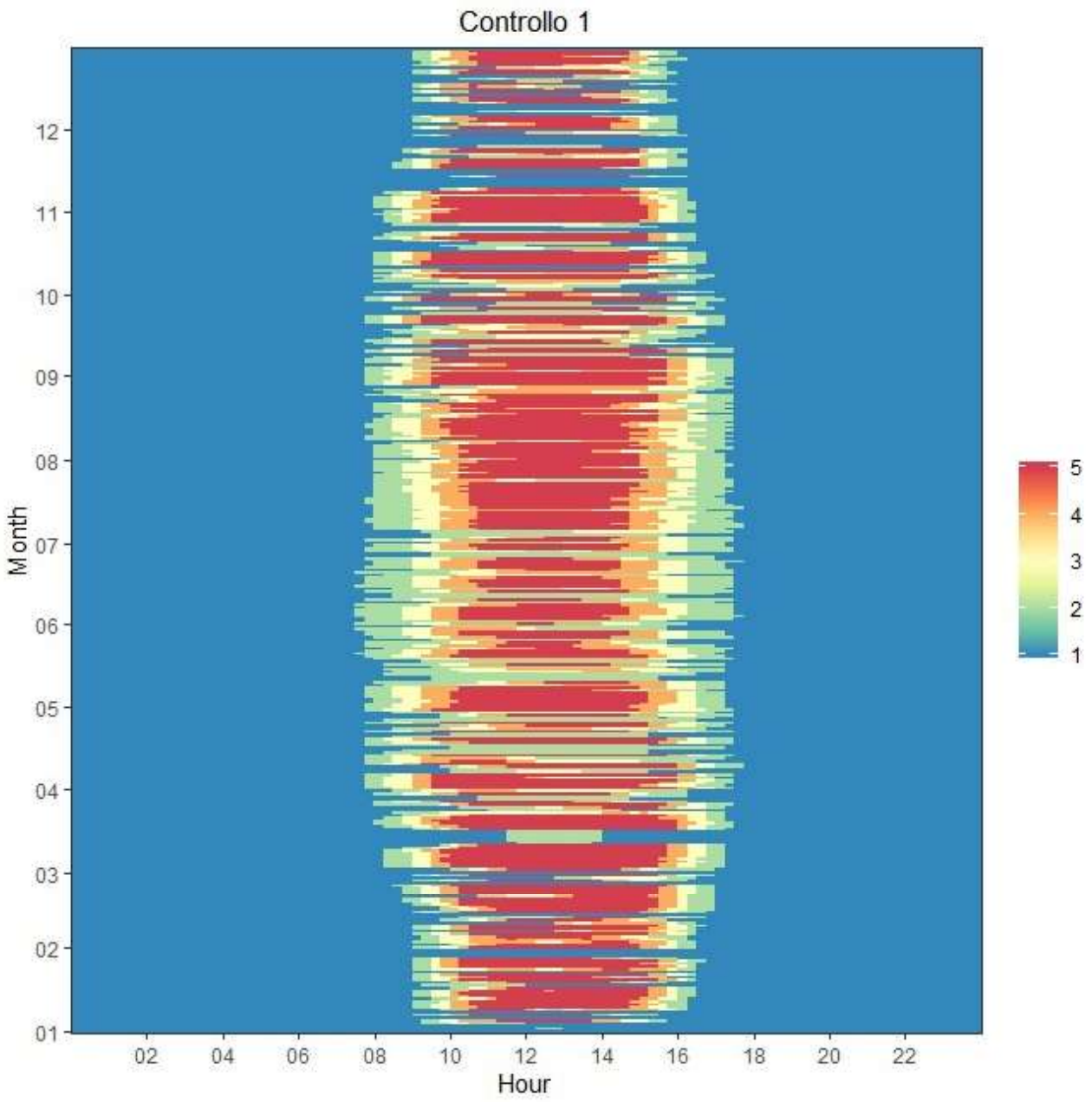

Figura 56 Carpet plot Controllo 1

6.3 Controllo 2

Lo stato dei vetri elettrocromici è basato sui valori soglia della temperatura dell'aria interna, indicati nel grafico di Figura 57; tale controllo è stato scelto anche per testare l'algoritmo di controllo basato sul modello ridotto: si utilizza il controllo Rule Based come riferimento per la stima dell'accuratezza del controllo Model Based basato sul modello a parametri concentrati; se l'accuratezza sarà confermata, allora il modello ridotto potrà essere utilizzato per l'implementazione dei controlli real-time nella TWINS.

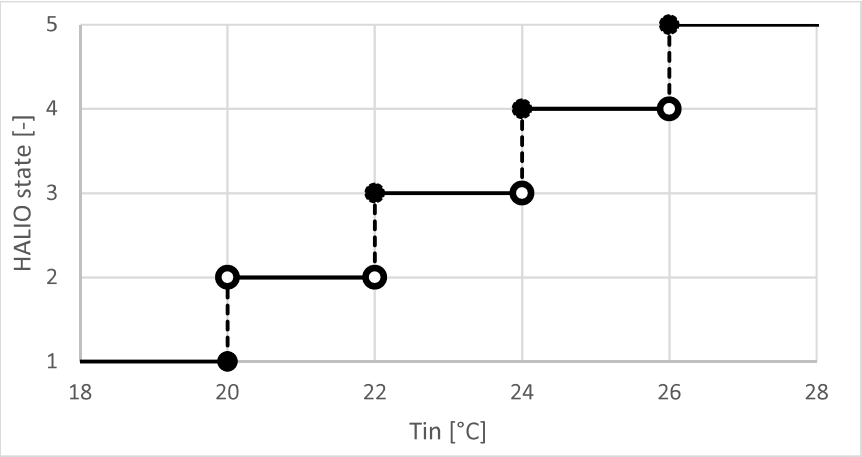

Figura 57 Valori soglia Controllo 2

Il controllo 2 implementato su EnergyPlus è Rule Based perché basato su valori soglia della temperatura dell'aria interna; il controllo implementato tramite il modello ridotto è invece Model Based, perché il controllo ha bisogno del modello che predice la temperatura al timestep successivo e in base a tale valore deciderà quindi lo stato del vetro. È stata utilizzata la seguente nomenclatura: il Controllo 2RB (Rule Based) si riferisce al controllo su EnergyPlus, mentre il controllo 2MB (Model Based) si riferisce al controllo tramite il modello ridotto.

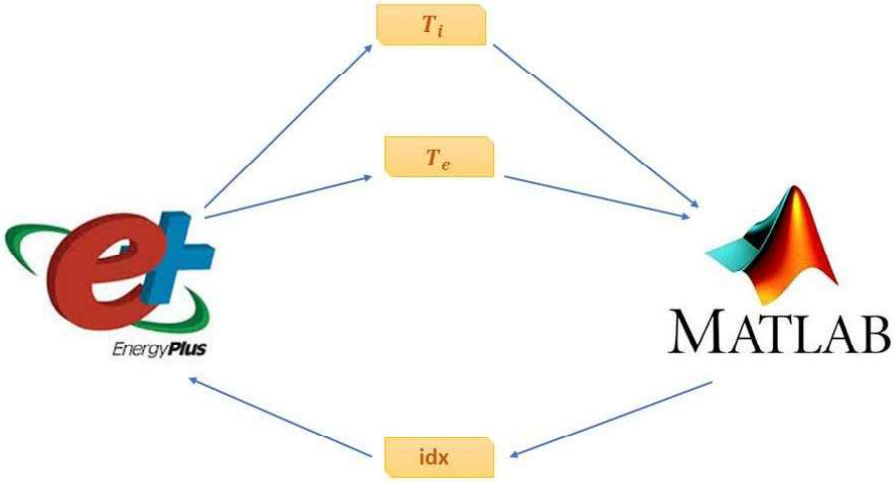

Figura 58 Flow chart BCVTB

Per eseguire il controllo 2MB è stato utilizzato il software di co-simulazione BCVTB mettendo in collegamento EnergyPlus con MATLAB su cui è implementato il modello RC Il codice per l'implementazione dei controlli 2RM e 2MB sono disponibili in Allegato V e VI). In Figura 58 è riportato il diagramma di flusso impostato su BCVTB: ad ogni timestep del controllo (15 minuti), MATLAB riceve in input da EnergyPlus la temperatura dell'aria interna della cella e la temperatura dell'aria esterna; questi 2 parametri saranno le condizioni iniziali del modello RC per predire la temperatura dell'aria interna al timestep; in base al valore predetto, l'algoritmo decide quindi lo stato del vetro secondo i valori soglia di Figura 57; MATLAB tiene in memoria lo stato del vetro scelto dal modello e lo manda poi in input ad EnergyPlus al timestep successivo. Il modello ridotto necessita di conosce le condizioni al contorno per la stima della temperatura interna dell'aria; in particolare ha bisogno di conosce la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare entrante attraverso il sistema vetrato, la radiazione globale e la potenza erogata dall'impianto. Per questo motivo sono stati caricati in MATLAB i dati meteo al minuto, ricavati tramite una simulazione annua su EnergyPlus utilizzando il file climatico standard. Il modello ridotto considera l'impianto sempre spento (condizione di *free-running)* e in base alla temperatura stimata decide lo stato del vetro; è stata utilizzata questa ipotesi perché per la previsione della temperatura al timestep successivo bisogna conoscere la potenza che sarà richiesta dall'impianto nel quarto d'ora successivo e questa informazione non la si può ricavare a priori perché è strettamente legata alle condizioni del timestep precedente.

Per la validazione del controllo sono stati considerati i seguenti parametri:

- Lo stato del vetro scelto dai due controlli diversi;
- Il fabbisogno energetico totale;

Il riferimento per la validazione è il controllo 2RB, perché l'algoritmo decisionale è basato sui valori simulati dal modello di EnergyPlus. Per tenere conto della capacità del controllo 2MB di decidere lo stato del vetro, è stato definito il grado di accuratezza A_c, che indica quante volte in un anno lo stato del vetro deciso dall'algoritmo 2MB coincide con quello del controllo 2RB:

$$A_c = \frac{n_{cor}}{n_{tot}} \tag{6.1}$$

n_{cor} indica le volte in cui lo stato del vetro scelto dai due controlli coincidono, riferito al totale dei controlli n_{tot}.

Control	A_c [-]	Heating [MWh]	Cooling [MWh]	Total energy [MWh]
2 RB	96%	2.102	0.357	2.459
2 MB		2.104	0.358	2.461

Tabella 31 Validazione controllo 2MB

In Tabella 31 sono riportati i valori dei due parametri di validazione: i due parametri convalidano l'accuratezza del controllo 2MB rispetto al controllo Rule Based. Sebbene il controllo Model Based lavori in free-running, l'effetto che ha sul fabbisogno energetico totale è

molto simile a quello stimato tramite l'implementazione del controllo Rule Based. Il controllo 2MB "sbaglia" infatti solo il 4% delle volte in un anno (pari a 1265 volte su un totale di 35040 controlli), con un aumento trascurabile dell'energia totale richiesta dall'impianto (scarto relativo minore dell'1%); in tutti i casi il controllo 2MB anticipa o ritarda di massimo 2 timestep lo stato del vetro scelto dal 2RB e ciò avviene durante le ore centrali del giorno, in particolar modo dalle 12:00 alle 14:00, con una maggiore incidenza nei mesi estivi.

Per una valutazione qualitativa dei due controlli, sono di seguito riportati sia i carpet plot di confronto dello stato del vetro scelto dai 2 controlli sia il confronto in termini di temperatura dell'aria interna, stato del vetro ed energia totale richiesta dall'impianto in 2 periodi diversi dell'anno (uno invernale e uno estivo).

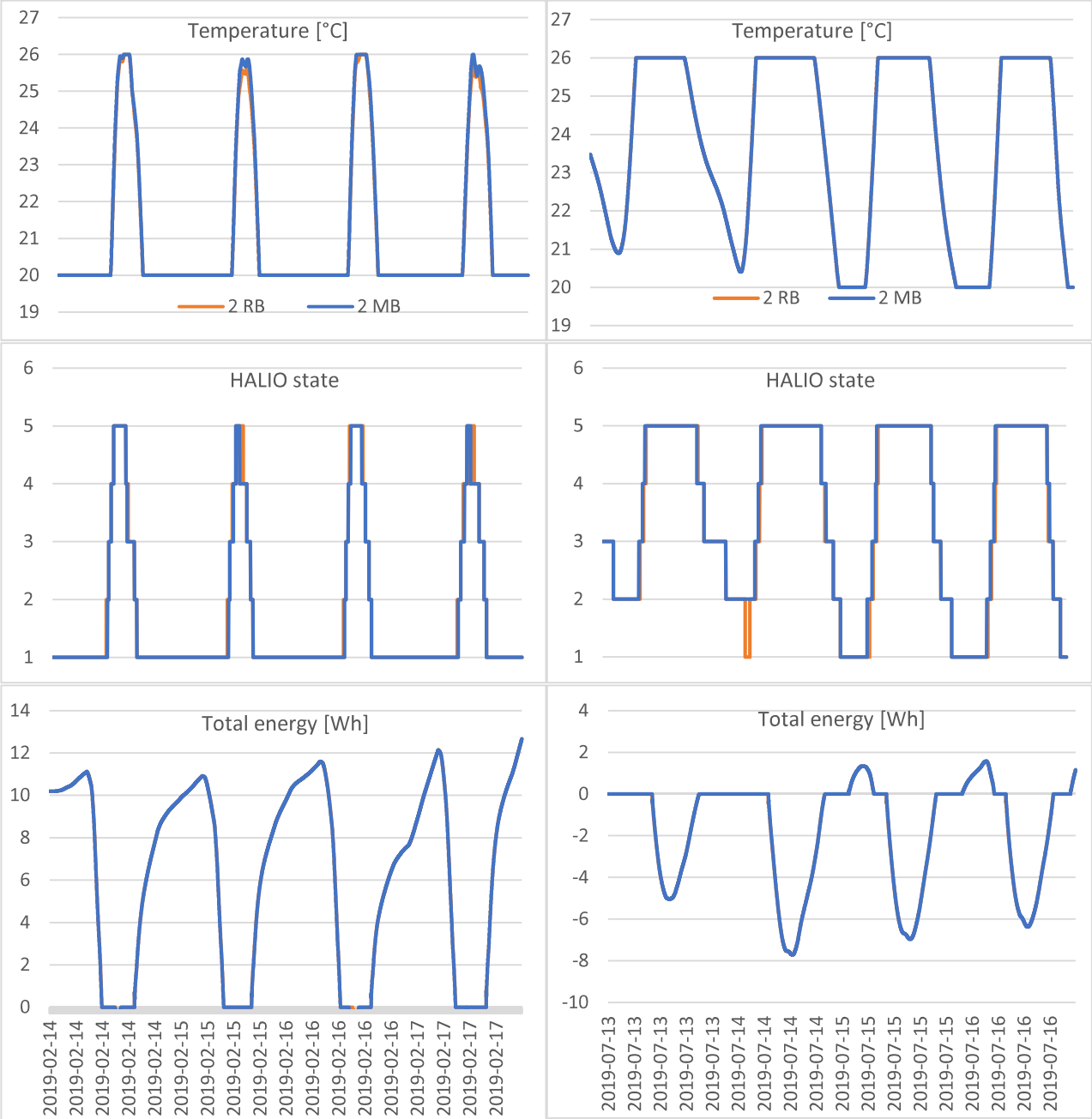

Figura 59 Confronto della performance Controllo 2

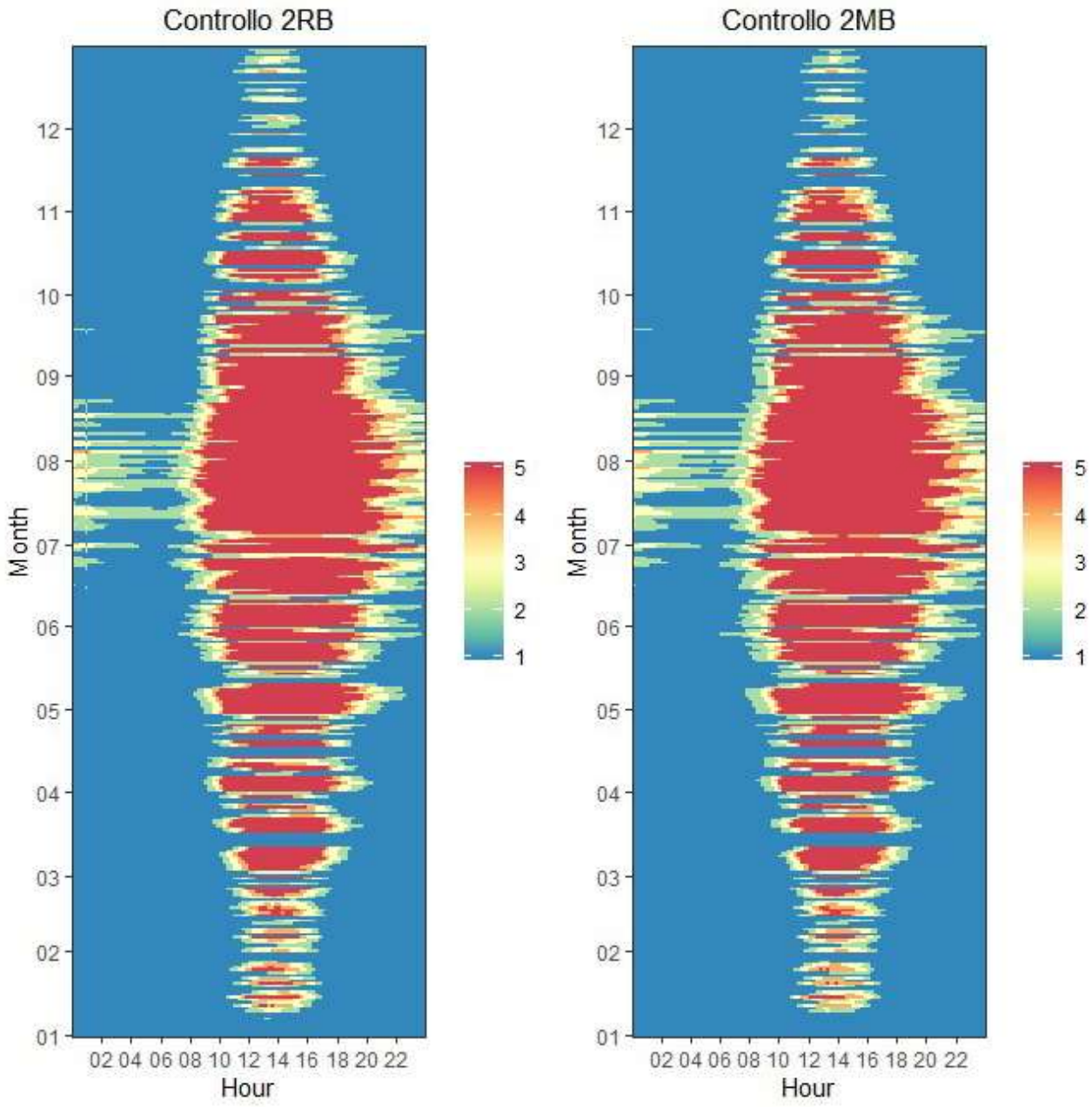

Figura 60 Confronto dei carpet plot del Controllo 2 con i 2 metodi diversi

Il Controllo 2 tende quindi a mantenere chiaro il vetro durante l'inverno e a scurirlo durante le ore centrali dei giorni cha vanno da Giugno a Settembre. Non si rilevano particolari differenze tra i due carpet plot. La Figura 59 mostra che in termini di temperatura la differenza più evidente è durante l'inverno che comporta una scelta diversa del controllo (il controllo 2MB anticipa o ritarda di al massimo 2 timestep la scelta effettuata dal controllo 2RB) ma che non ha un effetto evidente sul fabbisogno energetico totale. La scelta dello stato presenta invece più disparità in estate.

6.4 Controllo 3

Validato il modello ridotto sul controllo 2, si procede quindi all'implementazione di una strategia di controllo più avanzata che sfrutti le proprietà predittive del modello ridotto: lo stato dei vetri elettrocromici è scelto in modo da ridurre al minimo la differenza tra la temperatura dell'aria interna predetta dal modello e la temperatura di set-point; il controllo 3 risolve dunque la seguente funzione obiettivo (il codice di controllo è in Allegato VIII):

$if\ 20°C < T_{int,15,x} > 26°C$

$$X(t) = \max\,(g_{value})$$

$else$

$$\min \begin{cases} f(X) = \left|T_{int,15} - T_{set}\right| & [°C] \\ X(t) = g_{value} & [-] \\ Tset = 20°C & if\ heating \\ Tset = 26°C & if\ cooling \end{cases} \tag{6.2}$$

È un controllo di tipo Model Based, perché l'algoritmo decisionale necessita di un modello per scegliere lo stato del vetro. In particolare, il modello stima la temperatura al timestep successivo con i cinque stati del vetro indicati in Tabella 26 e sceglie lo stato del vetro in base alle seguenti regole:

1. Se almeno una delle temperature stimate si trova all'interno della banda di accettabilità [20°C - 26 °C] allora sceglie lo stato del vetro corrispondente;
    1.1 se ci sono più temperature dentro il range, allora sceglie lo stato del vetro più chiaro;
2. Se nessuna delle temperature è all'interno del range, allora sceglie lo stato del vetro che minimizza la differenza di temperatura tra il set-point di heating (20°C) o cooling (26°C) e la temperatura interna della cella;

Durante le ore notturne è stato inoltre imposto di *default* lo stato del vetro più chiaro HALIO 73. È stato scelto come parametro di controllo la differenza di temperatura perché è proporzionale alla potenza richiesta dall'impianto per portare la temperatura interna a quella di set-point; minimizzando la differenza di temperatura, si minimizza quindi l'energia richiesta dall'impianto.

Il carpet plot di Figura 61 mostra gli stati del vetro scelti dall'algoritmo decisionale; è chiaro che in questo modo viene estremizzato il controllo del vetro utilizzando maggiormente gli stati limite del vetro (HALIO 73 o HALIO 5). Questo è dovuto al fatto che quando la temperatura dell'aria è minore di 20°C allora il controllo sceglie di utilizzare lo stato del vetro più chiaro per massimizzare la quantità degli apporti solari trasmessi attraverso i vetri, viceversa se la temperatura è maggiore di 26°C il controllo sceglierà lo stato più scuro per ridurre gli apporti solari che causano *over-heating.* Dalla **Errore. L'origine riferimento non è**

stata trovata. è inoltre evidente che si ha un peggioramento delle performance rispetto al Controllo 2 soprattutto dovuti al fabbisogno per il raffrescamento.

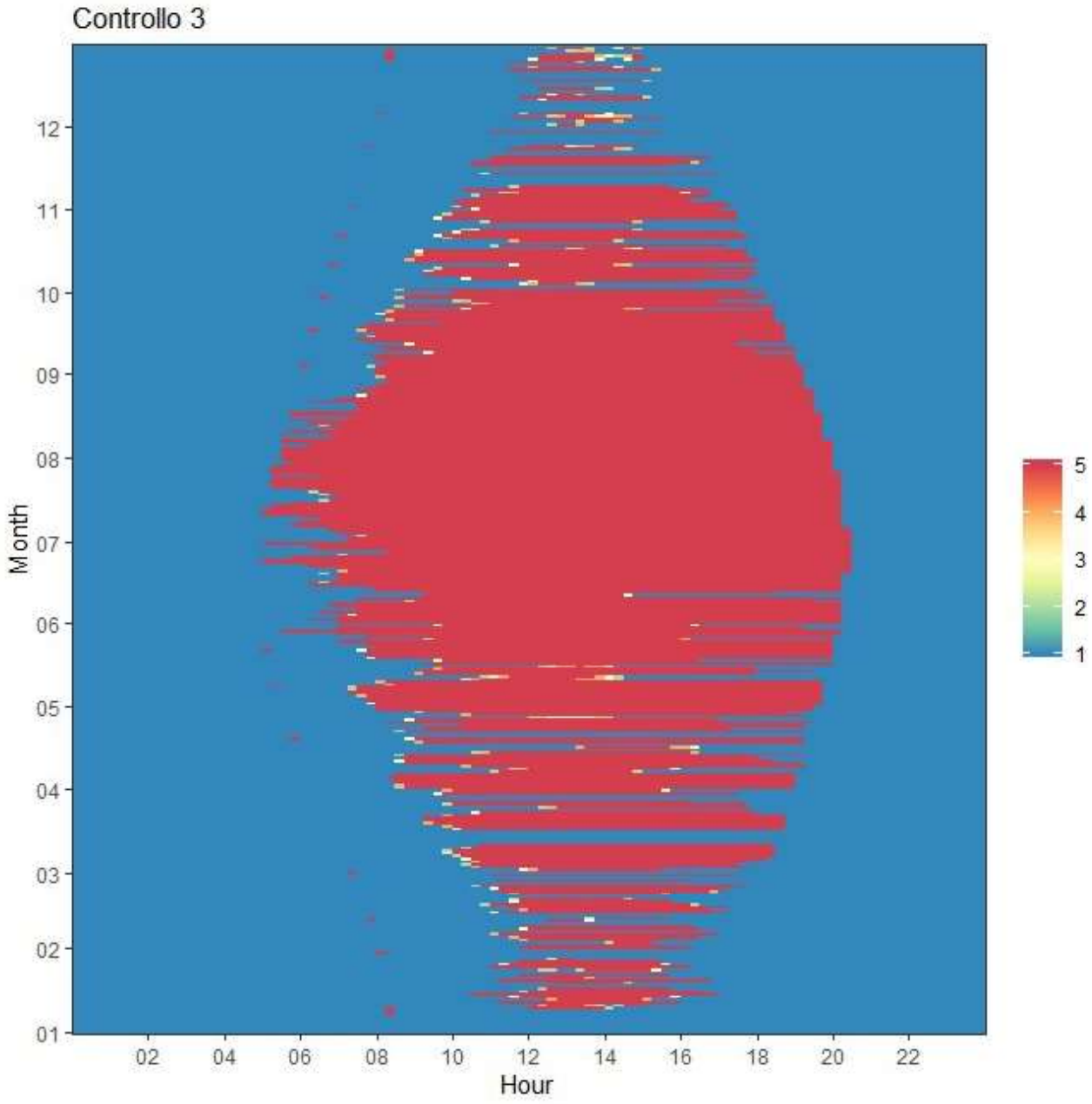

Figura 61 Carpet plot Controllo 3

Si vuole dunque affinare tale logica di controllo, andando a sfruttare a pieno le potenzialità del modello ridotto. È stato creato un nuovo controllo, a partire dal Controllo 3, che tenga conto del trend della temperatura interna: la logica di controllo non considera solo la temperatura dell'aria interna al successivo timestep, ma anche del valore della temperatura dopo 2 timestep. In questo modo il controllo può decidere in modo predittivo lo stato del vetro in funzione di ciò che avverrà in cella 30 minuti dopo; il controllo infatti non ha un effetto immediato sulla temperatura, ma avrà un certo ritardo dovuto all'inerzia termica.

Tramite questo ultimo tipo di controllo quindi si può intervenire in modo preventivo sul controllo della radiazione solare entrante in ambiente con lo scopo di ridurre al minimo la quantità di energia richiesta dall'impianto. Ad esempio, se in estate ad un determinato timestep il modello prevede che dopo 15 minuti la temperatura è dentro la banda di accettabilità [20°C – 26°C] ma è previsto un trend positivo di temperatura tale per cui dopo 30 minuti sarà al di fuori della banda di accettabilità, allora il controllo preventivamente scurisce il vetro, in modo da ridurre tale trend.

Il nuovo controllo quindi risolve la seguente funzione obiettivo:

$if\ 20°C < T_{int,15,x} > 26°C$

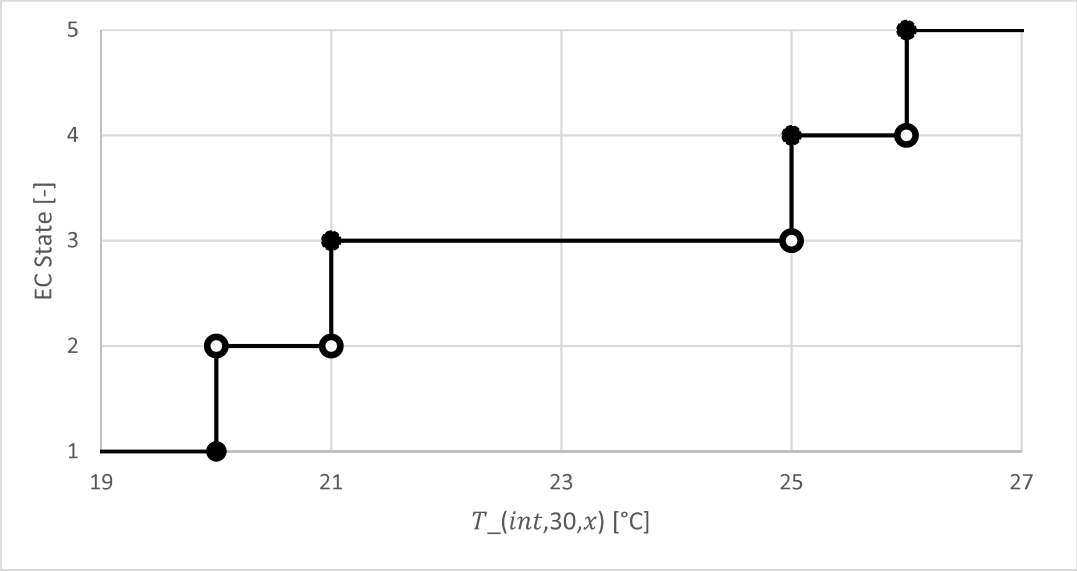

Figura 62 Controllo 3bis in funzione della temperatura prevista dopo 30 minuti

$else$

(6.3)

$$\min \begin{cases} f(X) = \left|T_{int,15} - T_{set}\right| & [°C] \\ X(t) = g_{value} & [-] \\ Tset = 20°C & if\ heating \\ Tset = 26°C & if\ cooling \end{cases}$$

Confrontando dunque il carpet plot di Figura 61 con quello di Figura 63 è possibile notare che il controllo 3bis va un po' a smorzare il controllo estremizzato del primo algoritmo Model Based, con evidenti differenze durante tutto l'anno: in particolare durante i mesi invernali sceglie lo stato di massima colorazione solo nelle ore centrali del giorno, mentre durante i mesi estivi si ha un graduale passaggio tra Stato 1 e Stato 5. Tutto ciò si traduce in un miglioramento delle prestazioni rispetto al controllo 3 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), confermando quindi che controllando lo stato dei vetri elettrocromici in

funzione del trend di temperatura atteso è possibile migliorare la prestazione energetiche della cella.

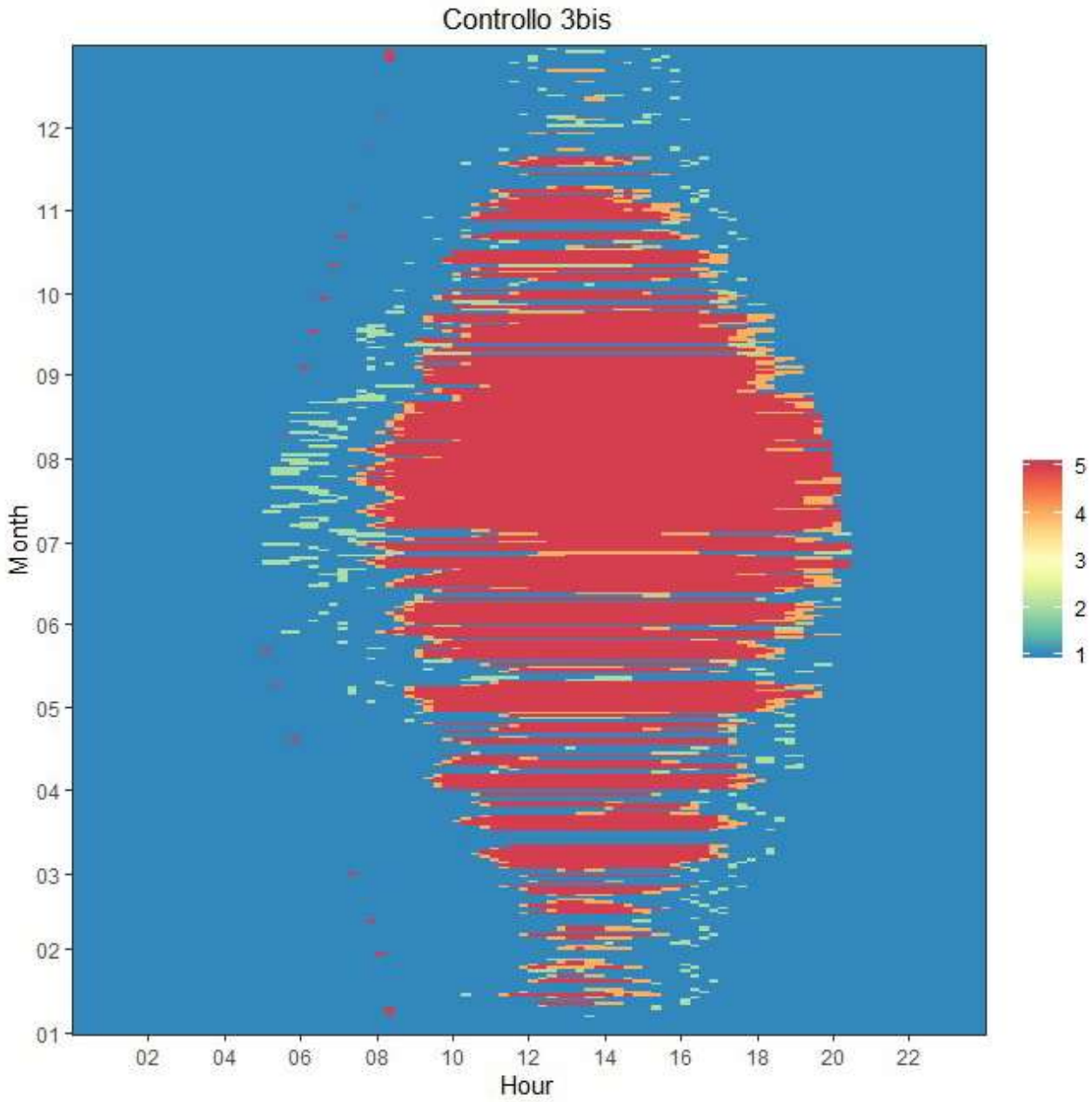

Figura 63 Carpet plot Controllo 3bis

6.5 Risultati e confronti

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** vengono riportati i confronti delle prestazioni energetiche ottenuti attraverso l'implementazione dei controlli appena descritti. Il parametro da tenere conto è la quantità di energia specifica richiesta dall'impianto durante l'anno di simulazione. La quantità di energia totale dell'impianto è a somma dell'energia di riscaldamento e raffrescamento (considerata positiva).

Control	Heating [MWh]		Cooling		Total energy		Performance vs Benc1		
	[MWh]	[kWh/m²]	[MWh]	[kWh/m²]	[MWh]	[kWh/m²]	Heating [%]	Cooling [%]	Total Energy [%]
Benc1	2.09	372.8	0.64	114.3	2.73	487.1	-	-	-
Benc2	2.19	391.4	0.34	60.8	2.53	452.2	-	-	-
1	2.14	382.4	0.38	67.1	2.52	449.5	2.6%	-41.3%	-7.7%
2RB	2.10	375.4	0.36	63.8	2.46	439.1	0.8%	-44.2%	-9.8%
2MB	2.10	375.7	0.36	63.9	2.46	439.5	0.7%	-44.1%	-9.8%
3	2.09	373.6	0.38	68.6	2.48	442.2	0.2%	-40.0%	-9.2%
3bis	2.10	374.6	0.35	63.1	2.45	437.7	0.5%	-44.8%	-10.1%

Tabella 32 Confronto performance dei controlli

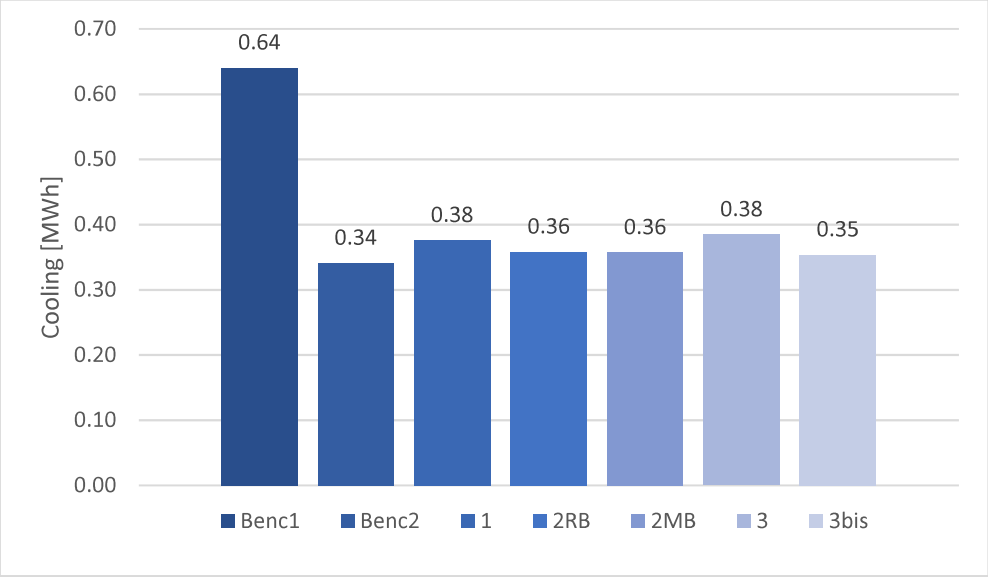

Figura 64 Confronto energia richiesta per il raffrescamento

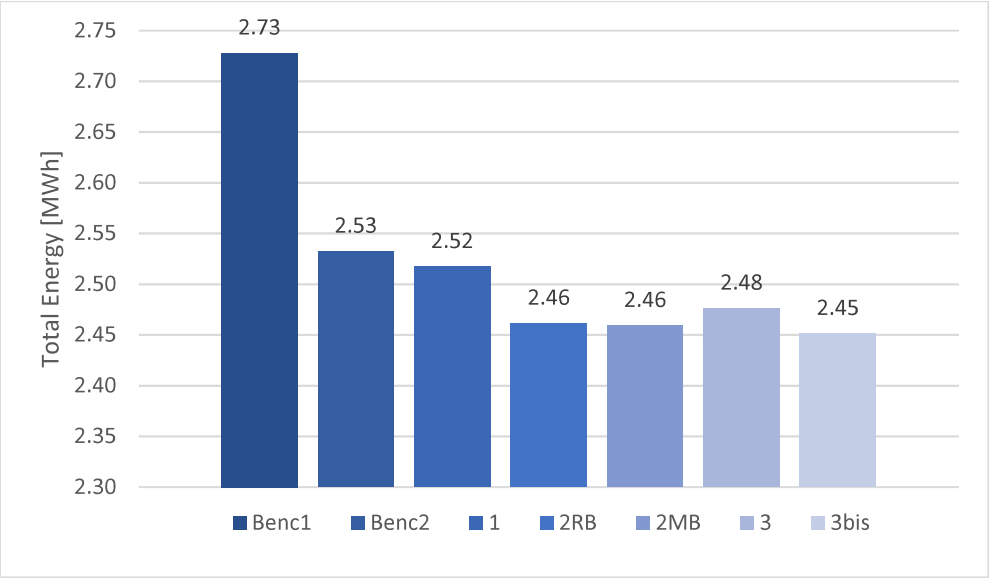

Figura 65 Confronto dell'energia totale

La Tabella 32 mostra i risultati ottenuti con l'implementazione dei controlli. È da notare come i due controlli di benchmark corrispondano alle condizioni ottimali rispettivamente per il riscaldamento e per il raffrescamento, ma non per il totale di energia annua; questo conferma che il vetro statico, se pur con ottime prestazioni energetiche, non è sicuramente la migliore tecnologia per garantire performance positive durante tutto l'arco dell'anno.

Per quantificare il risparmio ottenuto grazie all'utilizzo dei vetri elettrocromici è stato preso come riferimento Benc1 in modo da comparare l'effetto dei vetri adattivi rispetto all'utilizzo di vetri statici chiari, che sono i vetri più comunemente utilizzati nell'edilizia. Questo si ripercuote in modo rilevante sul calcolo degli scarti per il riscaldamento perché il Benc1 è la soluzione ottimale per ridurre la quantità di energia richiesta per il riscaldamento; dall'altro lato però mostra il miglioramento delle prestazioni sia in termini di raffrescamento che sull'energia totale.

È evidente che tutti i controlli mostrano un'ingente riduzione di *cooling*, grazie al controllo diretto degli apporti solari; si passa da una riduzione del 40% del controllo 3 fino a circa il 45% per il controllo 3bis. Già dall'analisi della letteratura risultava evidente che i vetri elettrocromici producono maggiori effetti durante il raffrescamento perché sono in grado di modulare in maniera attiva la quantità di radiazione solare trasmessa.

I risultati confermano inoltre che tra i controlli Rule Based, il controllo basato sulla temperatura dell'aria interna ha una prestazione energetica migliore rispetto al controllo basato sulla radiazione solare incidente. Tra tutti i controlli implementati infatti il controllo 1 causa il maggior aumento del fabbisogno di energia per il riscaldamento, con una riduzione totale di circa l'8%; il controllo 2 invece risulta essere efficiente durante il raffrescamento con una riduzione del fabbisogno di cooling pari al 44%.

Per quanto riguarda invece i controlli Model Based, il controllo 3bis risulta essere il più performante, con una riduzione del 10% dell'energia totale, dimostrando quindi che sfruttando le proprietà predittive del modello ridotto è possibile ottenere un aumento delle prestazioni del sistema. Tali controlli però possono causare un peggioramento delle prestazioni rispetto ai controlli più semplici, come avviene nel caso del controllo 3: si stima infatti che tale controllo è il meno performante se si va a considerare solo il periodo di raffrescamento.

Dunque, il controllo più performante in termini di fabbisogno energetico totale è senza dubbio il Controllo 3bis, che produce una performance energetica di poco superiore al Controllo 2RB che rimane il controllo più performante tra i controlli di tipo Rule Based.

Senza ombra di dubbio, erano attesi dei valori di maggiori di risparmio energetico che non li rende competitivi dal punto di vista economico rispetto all'utilizzo di vetri statici altamente performanti quali ad esempio i vetri con rivestimento basso emissivo. C'è da dire però che la presenza del vetro statico limita sicuramente la prestazione dell'intero sistema vetrato: come mostrato in Tabella 27, il valore di g^* dell'intera struttura vetrata varia da 0.2 fino a 0.47. Come evidenziato in [3], un range ridotto di g^* limita fortemente la prestazione energetica dei vetri dinamici in generale; un limite inferiore così alto infatti equivale ad un'attenuazione massima del 20% sul totale della quantità di radiazione incidente il sistema vetrato.

7. Conclusione e sviluppi futuri

L'obiettivo principale della tesi è stato quello di individuare strategie di controllo avanzate per il controllo attivo degli apporti solari con il fine del massimo risparmio di energia per la climatizzazione attraverso delle analisi sperimentali e simulative effettuate presso la cella di prova del Politecnico di Torino.

Sulla facciata esposta a Sud della cella è presente una struttura vetrata attiva, formata da un doppio vetro statico con trattamento basso emissivo e due vetri elettrocromici che presentano le stesse proprietà del vetro statico quando si trovano nello stato di massima trasparenza.

La caratterizzazione sperimentale degli elementi di involucro della cella ha permesso la quantificazione delle caratteristiche termofisiche di tali componenti, in particolare la trasmittanza termica dei componenti opachi, la verifica dei coefficienti di trasmissione dei vetri dinamici nei due stati estremi e i ricambi d'ora dovuti alla ventilazione naturale. Tali valori servono per lo sviluppo di un modello energetico in grado di stimare le prestazioni energetiche dell'edificio tramite simulazione numeriche.

La calibrazione sui dati sperimentali è stata di fondamentale importanza per ottenere un modello energetico che descriva bene il comportamento del sistema in esame. Consiste nel variare iterativamente dei parametri di input del modello in modo da minimizzare la differenza tra i parametri stimati e misurati sperimentalmente. Avere un modello calibrato permette il calcolo delle performance energetiche con un'elevata accuratezza dei valori simulati in tempi più rapidi rispetto alle misurazioni in campo.

Il fulcro della toolchain implementata è senza dubbio l'identificazione di un modello ridotto della cella a partire dai dati di simulazione del modello deterministico. L'utilizzo di un modello ridotto infatti ha grande potenzialità per il controllo dei vetri, permettendo tra l'altro il controllo real-time di tipo Model Based. È stato scelto un modello a due stati in grado di predire la temperatura dell'aria interna conoscendo 3 parametri esogeni e uno endogeno.

La valutazione dei controlli più performanti è stata poi effettuata confrontando sulla stessa cella di prova sia le performance di controlli di tipo Rule Based che quelli di tipo Model Based, tramite delle simulazioni annue.

L'implementazione della toolchain ha portato dunque ai seguenti risultati:

1. La creazione di un modello di tipo deterministico (*white-box*) e di un modello a parametri concentrati (*grey-box*) ridotto della TWINS che potranno essere utilizzati come punti di partenza di future esperienze sperimentali e simulative;
2. La capacità del modello ridotto di gestire bene i controlli dei vetri dinamici;
3. Lo studio di strategie di controllo avanzate dei vetri elettrocromici;

Per quanto riguarda i controlli dei vetri si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. È stato confermato tramite simulazioni energetiche di tipo deterministico che le strategie di controllo di tipo Rule Based basate sulla temperatura dell'aria interna comportano la riduzione maggiore del fabbisogno energetico della cella di prova; in particolare si stima che tale controllo comporti una riduzione del 9.8% dei consumi di energia totale dovuta alla climatizzazione (somma in valore assoluto dei carichi termici per il riscaldamento e il raffrescamento) rispetto all'utilizzo di un doppio vetro statico basso emissivo. La riduzione maggiore si ha durante il raffrescamento per il quale è stato registrato una riduzione del 44% del fabbisogno.
2. Il modello ridotto è in grado di gestire il controllo dei vetri in modo molto accurato; è stata valutata la sua performance andando a confrontare lo stato del vetro scelto e l'energia richiesta dall'impianto in confronto con i risultati ottenuti dal modello Rule Based basato sulla temperatura dell'aria interna. Il modello ha mostrato un'elevata accuratezza (96%) con uno scarto relativo dell'energia pari minore dell'1%.
3. Il primo tipo di controllo Model Based ha mostrato però una riduzione delle performance rispetto al controllo 2; questo dimostra che le prestazioni dei vetri sono strettamente correlate con il tipo di controllo implementato. Il controllo 3 risolve la funzione obiettivo che minimizza la differenza di temperatura tra ambiente interno e temperatura di set-point perché è proporzionale al fabbisogno di energia totale. Il controllo 3 però ha estremizzato i controlli, andando a scegliere solo gli stati di massima trasparenza o di massima colorazione dei vetri, non agendo quindi in modo intelligente sul controllo della radiazione solare. Il controllo infatti ha causato un aumento del fabbisogno di energia per il raffrescamento, dovuto essenzialmente all'ipotesi decisionale dell'algoritmo che comporta un aumento della temperatura al successivo timestep se in presenza di un'elevata radiazione solare.
4. Il controllo avanzato 3bis è il migliore controllo che comporta una riduzione del 10.1% con una riduzione di circa il 45% sul raffrescamento. Tale controllo infatti sfrutta a pieno le potenzialità del modello ridotto, andando a basare le scelte non solo sulla temperatura stimata al timestep successivo ma anche dal trend di temperatura stimato dal modello stesso. In base alle stime a più largo raggio infatti il controllo può preventivamente agire sullo stato del vetro, decidendo in base al trend previsto dal modello. Questo permette di tenere conto dell'inerzia termica del sistema, nel senso che il controllo non ha un effetto immediata sulla temperatura interna ma ci sarà un certo sfasamento dovuto alla capacità di tutto il sistema di immagazzinare l'energia termica.
5. Tutti i controlli rivelano che la vera potenzialità dei vetri elettrocromici riguarda la riduzione del fabbisogno di riscaldamento. I vetri infatti modulano la quantità di energia solare trasmessa, andando a ridurre il fabbisogno energetico. Durante il riscaldamento possono per lo più massimizzare la trasparenza del vetro.
6. La presenza del doppio vetro statico ha ridotto la prestazione energetica del sistema vetrato, andando a ridurre il range entro cui può variare la g-value.

È chiaro che il presente lavoro di tesi presenta quattro limitazioni principali:

1. La mancanza di un impianto funzionante ha limitato la calibrazione del modello deterministico, utilizzando come parametro di convalida solo la temperatura; usualmente per la calibrazione del modello si scelgono come parametri sia la temperatura dell'aria interna che il fabbisogno di energetico perché la temperatura può essere influenzata da fattori locali quali ad esempio la presenza di radiazione solare diretta sulle termocoppie, il fabbisogno energetico quantifica il comportamento dell'intero involucro;
2. La calibrazione è stata svolta solo sui dati misurati tra Marzo e Aprile 2019. Questo limita i dati utilizzabili per la calibrazione, che non tengono conto di condizioni estreme come quelle della stagione estiva o invernale; si potrebbe dunque verificare l'accuratezza del modello durante i due periodi appena descritti per avere un'ulteriore conferma della validità del modello energetico utilizzato.
3. Il modello ridotto scelto è strettamente legato alla temperatura dell'involucro edilizio Te che però non è possibile calcolare direttamente per l'implementazione dei controlli real-time. Se da un lato l'utilizzo di tale parametro è essenziale per tenere conto della capacità termica dei componenti opachi, dall'altro costituisce un valore di incertezza elevato per l'identificazione delle condizioni iniziali del modello. È infatti un parametro fittizio, definito come la temperatura interna dell'involucro lungo la linea di mezzeria non legata allo spessore, ma alla capacità termica dell'involucro opaco (dove può considerarsi concentrata la capacità termica) che non può essere misurata direttamente; il valore influenza in modo diretto il valore stimato della temperatura dell'aria interna, potenzialmente compromettendo l'accuratezza del modello ridotto. Tale parametro ha limitato l'implementazione delle regole di controllo, in quanto il tentativo di predizione della potenza termica dell'impianto, teoricamente fattibile a partire dalle stesse equazioni del modello ridotto, ha generato errori molto grandi derivanti dalla cattiva stima della Te.

Le possibili evoluzioni future di tale lavoro sono dunque:

1. Migliorare la stima di Te tramite tecniche matematiche avanzate (i.e. il filtro di Kalman);
2. Implementazione di controlli avanzati, come ad esempio l'MPC, in modo da sfruttare a pieno le potenzialità del modello RC. Si potrebbero considerare anche modelli con un controllo indipendente dei due vetri in modo da risponde a pieno a tutte le condizioni al contorno della cella; ciò è possibile grazie all'utilizzo del modello RC continuo.
3. Implementazioni dei controlli real-time sulla TWINS;

8. Bibliografia

[1] European Parliament and Council. *Directive 2010/31 EU Recast on the energy performance of buildings*. Official Journal of the European Union.

[2] Favoino F., Fiorito F., Cannavale A., Ranzi G., Overend M., *Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates*. Applied Energy 178 (2016), 943-961.

[3] Assimakopoulos M.N., Tsangrassoulis A., Santamouris M., Guarracino G., *Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies*. Building and Environment 42 (2007) 2829-2834.

[4] Ritter V., Matschi C., Schwarz D., Assessment of five control strategies of an adjustable glazig at three different climate zones. Journal of Façade Design and Engineering 3 (2015) 129-141.

[5] Serra V., Zanghirella F., Perino M., *Experimental evaluation of climate facade: Energy efficiency and theral comfort performance*. Energy and Buildings 42 (2010), 50-62.

[6] Pepe D., Tesi magistrale, *Controllo dinamico della radiazione solare con smart glazing per il comfort termico ambientale: caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche.* Politecnico di Torino, 2019.

[7] Rezai S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S., *A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment*. Solar Energy Materials & Solar Cells 159 (2017) 26-51.

[8] UNI EN 410:2011, *Glass in building- Determination of luminous and solar characteristics of glazing*.

[9] UNI-TS 11300-1:2014, *Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*.

[10] Ye H., Meng X., Long L., Xu B., *The route to a perfect window*. Renewable Energy 55 (2013) 448-455.

[11] Cuce E., Riffat S., *A state-of-art review on innovative glazing technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2015) 695-714.

[12] Granqvist C.G., *Electrochromics and thermochromics: towards a new paradig for energy efficient buildings.* Materials Today: Proceedings 3S (2016) S2-S11.

[13] Niklasson G.A., Granqvist C.G., *Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these*. The Royal Society of Chemistry 17 (2007) 127-156.

[14] Heiz B.P.V., Pan Z., Su L., Le S.T., Wondraczek L., *A large-area smart window with tunable shading and solar-termal harvestin ability based on remote switching of a Magneto-Active Liquid*. Advanced Sustainable System(2017).

[15] Cannavale A., Fiorito F., Resta D., Gigli G., *Visual comfort assessment of smart photovoltachromic windows*. Energy and Bildings 65 (2013) 137-145.

[16] Bianco L., Cascone Y., Avesani S., Vullo P., Bejat T., Loonen R., Koenders S., Goia F., Serra V., Favoino F., *Toward new metrics for the characterisation of the dynamic performance od Adaptive façade systems*. Journal of façade design & Engineering 6 (2018).

[17] Goia, F,. Perino, M., Serra, V. *Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype*. Solar Energy 100 (2014), 217–233

[18] Oldewurtel F., Parisio A., Jones C.N., Gyalistras D., Gwerder M., Stauch V., Lehmann B., Morari M., *Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control*. Energy & Buildings 45 (2012) 15-27.

[19] Karlsson J., *Control system and energy savings potential for switchable windows*. Seventh International IBPSA Conference 2001

[20] Jonsson A., Roos A., *Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations*. Solar Energy 84 (2010) 1-9.

[21] Gugliermetti F., Bisegna F., *Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate*. Building and Environmant 38 (2003) 479-492.

[22] Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A., *Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities*. Energies 11 (2018).

[23] Lu Y., Wang S., Shan K., *Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings*. Applied Energy 55 (2015), 463-477.

[24] Favoino F., PhD Thesis, *Building performance simulation of adaptive facades*. University of Cambridge.

[25] U.S. DOE. *EnergyPlus Engineering Reference*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, United State.

[26] U.S. DOE. *Application guide for EMS Energy Management System-User guide*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, United State.

[27] *Building Controls Virtual Test Bed – User Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory (2016).

[28] DataTaker, *User Manual DT80 Range.*

[29] Hukseflux, *User Manual HFP01 & HFP03.*

[30] Hukseflux, *User Manual LP02.*

[31] Goia F., Serra S., *Analysis of a non-calorimetric method for assessment of in-situ thermal trasmittance and solar factor of glazed systems*. Solar Energy 166 (2018), 458-47.

[32] Corgnati S.P., Perino M., Serra V., *Experimental assessment of the performance of an active transparent façade during actual operating conditions.* Solar Energy 81 (2007), 993-1013.

[33] EN ISO 9869-1:2014, *Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal trasmittance – Part 1: Heat flow meter method*

[34] UNI EN ISO 6946:2008, *Building Components and Building Elements- thermal Resistance and Thermal Trasmittance – Calculation Method.*

[35] UNI EN ISO 9972:2015 *Prestazione termica degli edifici- Determinazione della permeabilità dell'aria degli edifici – Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore.*

[36] http://smartgreenbuilding.polito.it/monitoraggio/

[37] *Elements User Guide*. Big Ladder Software. https://bigladdersoftware.com/projects/elements/docs/user-guide/

[38] L'ASHRAE Guideline 14:2002, *Measurement of Energy and Demand Savings*.

[39] Ahmad T., Chen H., Guo Y., Wang J., *A comprehensive overview on the data driven and large scale-based approaches for forecasting of building energy demand: A review*. Energy and Building 165 (2018) 301-320.

[40] Andersen K.K., Madsen H., Hansen L.H., *Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations*. Energy and Buildings 31 (2000) 13-24.

[41] Bacher P., Madsen H., *Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings.* Energy and Buildings 43 (2011), 1511-1522.

[42] Kristensen N.R., Madsen H., *Continuous Time Stochastic Modelling, CTSM 2.3-Mathematics Guide*. Tech. Rep., DTU, 2003.

[43] AGC. *HALIO – Technical presentation*, 2017.

[44] ASHRAE 2005 Handbook. *Fundamentals IP Edition.*

[45] *WINDOW 7 User Manual*. Lawrence Berkeley National Laboratory (2019).