

# POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e  
Nucleare



## Integrazione di sistemi di controllo avanzati per sistemi di facciata responsivi

Relatori

Prof. Alfonso CAPOZZOLI

Dr. Fabio FAVOINO

Dr. Francesco ISAIA

Candidata

Noemi DIPIERRO

2020/2021



## Abstract

Il cambiamento climatico ed il fenomeno del riscaldamento globale hanno creato, negli ultimi anni, l'urgenza di definire una riduzione drastica del consumo energetico. Il settore edilizio è responsabile di quasi la metà del consumo finale di energia e l'obiettivo principale è trovare delle soluzioni tecnologiche che permettano il risparmio energetico unito al comfort termico e visivo. Nell'involucro edilizio i componenti vetrati sono l'elemento più vulnerabile sia per le perdite di calore, che per gli apporti gratuiti. La maggior parte dell'energia è consumata nella costante ricerca di soddisfare condizioni di comfort termico interno, perciò l'intento è quello di riuscire ad utilizzare i componenti trasparenti dell'involucro per ridurre il consumo energetico. Nel campo delle tecnologie adattive intelligenti i vetri elettrocromici sono tra le soluzioni maggiormente sviluppate, in grado di cambiare le proprietà termo-ottiche e modulare la quantità di radiazione solare entrante nell'edificio, in risposta ad un impulso elettrico esterno. Gli studi contemporanei sono finalizzati alla costruzione di strategie di controllo che permettano di sfruttare a pieno le potenzialità di tali tecnologie, rispettando i requisiti prestazionali richiesti.

Lo scopo di questa tesi è lo sviluppo di varie strategie di controllo per i vetri elettrocromici, pensate per essere implementate in campo nella cella di prova del Dipartimento di Energia. Tali controllori sono implementati in modo da riuscire a cambiare il livello di trasparenza dei vetri elettrocromici e contemporaneamente gestire l'impianto di riscaldamento ed illuminamento in modo da controllare la temperatura interna dell'ambiente e garantire comfort visivo. Inizialmente sono state effettuate misure sperimentali, atte a calibrare i sensori ed a sistemare l'attrezzatura necessaria al controllo dei vetri. In seguito è stato calibrato un modello EnergyPlus della cella di prova, che rappresenta i moduli di facciata utilizzati negli edifici destinati agli uffici. Tale modello è stato utilizzato per effettuare varie simulazioni. Le analisi ed i confronti sono inizialmente stati effettuati tra controllori Rule Based, creati in modo da poter essere di facile applicazione in campo. Successivamente è stato creato un modello ridotto, che si basa sull'analogia elettrica RC, dal quale si ricava la temperatura dell'aria in funzione di tre variabili. Effettuate le analisi e i confronti dei vari tipi di controlli Rule Based, è stata proposta una strategia di controllo avanzata che massimizza il risparmio energetico della cella di prova.

Climate change and the phenomenon of global warming created, in recent years, the urgency of defining a drastic reduction in energy consumption. The construction sector is responsible for almost half of final energy consumption, so the main objective is to find technological solutions that allow energy savings combined with thermal and visual comfort. The glass components are the most vulnerable element in the building envelope, as consequence of both heat losses and solar gains. Most of the energy is consumed in the constant search to meet indoor thermal comfort conditions, so the intent is to be able to use the transparent components of the enclosure to reduce energy consumption. In the field of intelligent adaptive technologies, electrochromic glasses are among the most developed solutions, since they are able to change the thermo-optical properties and modulate the amount of solar radiation entering the building in response to an external electrical impulse. Contemporary studies are focused on the development of control strategies that allow to fully exploit the potential of these technologies, respecting the fundamental performance requirements.

The aim of this thesis is to implement various control strategies for electrochromic glasses, designed to be used in the field. These controllers are implemented in order to be able to change the level of tint of electrochromic glasses and simultaneously manage the heating and lighting system to control the  $T_{int}$  of the environment and ensure visual comfort. Initially, an Energyplus model is calibrated, representing the facade modules used in office buildings. This model is used to perform various simulations and subsequently to create a reduced model, which is based on the RC electrical analogy. Then, analyses and comparisons between the various types of Rule Based controls lead to a proposal of an advanced control strategy that maximizes the energy savings of the test cell.



# Table of Contents

<b>List of Tables</b>	IV
<b>List of Figures</b>	V
<b>1 Introduzione</b>	1
1.1 Motivazioni . . . . .	2
1.2 Obiettivi . . . . .	3
1.3 Struttura tesi . . . . .	3
<b>2 Stato dell'arte</b>	5
2.1 Parametri caratteristici di un componente vetrato . . . . .	5
2.2 Tecnologie componente vetrato . . . . .	6
2.2.1 Tecnologie tradizionali . . . . .	6
2.2.2 Tecnologie innovative . . . . .	7
2.3 Strategie di controllo . . . . .	13
2.3.1 Rule Based Control . . . . .	13
2.3.2 Model Based Control . . . . .	15
2.3.3 Applicazioni dei MPC agli edifici . . . . .	20
2.4 Software di simulazione e co-simulazione energetica . . . . .	26
2.4.1 EnergyPlus . . . . .	26
2.4.2 BCVTB . . . . .	27
<b>3 Caratterizzazione della cella</b>	28
3.1 Cella TWINS . . . . .	28
3.1.1 Set-up sperimentale . . . . .	29
3.1.2 Componenti trasparenti e caratterizzazione $\tau_{sol}$ . . . . .	31
3.1.3 Calibrazione sensori Raspberry Pi e set up Heater . . . . .	37
3.1.4 Correlazione tra attività sperimentale e simulativa . . . . .	41
<b>4 Configurazione della simulazione</b>	43
4.1 Modello EnergyPlus . . . . .	43

4.2	Modello semplificato . . . . .	45
4.2.1	Identificazione circuito RC . . . . .	46
4.2.2	Dati di input e stima parametri concentrati . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Strategie di controllo avanzate</b>	<b>55</b>
5.1	Controllo di riferimento . . . . .	56
5.2	Controlli sulla radiazione . . . . .	56
5.3	Controlli sulla temperatura . . . . .	58
5.4	Controlli sul Daylight . . . . .	58
5.5	Controlli sul Glare . . . . .	61
5.6	Controllo totale . . . . .	62
5.7	Controlli Predictive Rule-Based Control . . . . .	63
5.8	Risultati e confronti . . . . .	66
5.8.1	Gennaio . . . . .	67
5.8.2	Marzo . . . . .	75
5.8.3	Giugno . . . . .	81
5.8.4	Ottobre . . . . .	89
5.8.5	Simulazione Annuale . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Conclusione e sviluppi</b>	<b>98</b>
6.1	Sviluppi futuri . . . . .	103
<b>A</b>	<b>Controlli</b>	<b>104</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>136</b>

# List of Tables

3.1	Trasmittanza termica dei componenti opachi . . . . .	32
3.2	Proprietà ottiche strato elettrocromico . . . . .	34
3.3	Proprietà termo-ottiche finestra elettrocromica . . . . .	34
3.4	Coefficienti polinomiali $\tau_{sol}$ [biblio] . . . . .	35
4.1	Parametri statici modello validato . . . . .	44
4.2	Stati dei vetri elettrocromici e g-value associato . . . . .	49
4.3	Parametri identificati per il primo grey-box (autunno/inverno) . . .	52
4.4	Parametri identificati per il secondo grey-box (primavera/estate) .	53
5.1	Confronto performance dei controlli per Gennaio . . . . .	73
5.2	Confronto performance dei controlli per Marzo . . . . .	80
5.3	Confronto performance dei controlli per Giugno . . . . .	87
5.4	Confronto performance dei controlli per Ottobre . . . . .	94
5.5	Confronto performance dei controlli annuale . . . . .	96

# List of Figures

1.1	Workflow metodologia . . . . .	4
2.1	Finestra TC (a) prima della transizione (b) dopo la transizione [7] .	8
2.2	Schema dispositivo elettronico [11] . . . . .	10
2.3	Illustrazione schematica di una finestra EC (a) spenta, stato chiaro (b) accesa, stato scuro [7] . . . . .	11
2.4	Illustrazione operazione vetro SPD nello stato trasparente (DX) e nello stato opaco (SX) [16, 17] . . . . .	12
2.5	Schema metodologia MPC [25] . . . . .	15
2.6	Schema del principale <i>receding horizon</i> , la differenza tra la figura sopra e quella sotto è un time-step. [27] . . . . .	17
2.7	Confronto tra i modelli white-box, black-box e grey-box , [30] . . . .	19
2.8	Rete RC semplice del modello Ti [31] . . . . .	19
2.9	Schema dello sviluppo del controllo MB per illuminamento ed om- breggiatura [36] . . . . .	22
2.10	Illustrazione parametri inclusi nelle equazioni per il calcolo dell'angolo di cut-off [39] . . . . .	24
2.11	Schema della posizione del roller shade per la prevenzione dell'irraggiamento diretto sul piano di lavoro [35] . . . . .	25
3.1	Facciata Sud della cella TWINS A . . . . .	29
3.2	Schema sensori caratterizzazione componenti opaco . . . . .	30
3.3	Schema sensori per la misura della temperatura interna (sinistra) e caratterizzazione vetri (destra) . . . . .	31
3.4	(a)Piranometro esterno verticale, facciata Sud;(b)Termoflussimetro interno per un componente opaco;(c)Termocoppia schermata da mezzo cilindro di cartone e nastro alluminato e nastro che scherma il termoflussimetro interno, entrambi riferiti al componente ve- trato;(d)Piranometro interno . . . . .	32

3.5	Sensori utilizzati per i tre vetri. Da sinistra piranometro con schermatura, termoflussimetro e termocoppia superficiale interna ed esterna, schermate dall'esterno con nastro alluminato . . . . .	33
3.6	Sezione vetro HALIO . . . . .	33
3.7	Andamento coefficiente di trasmissione per gli stati intermedi . . . . .	35
3.8	Trasmissione solare angolare dei vetri HALIO . . . . .	36
3.9	Caratterizzazione $\tau_{sol}$ , clear state (in alto) e tinted state (in basso) . . . . .	36
3.10	Curve di taratura delle tre termocoppie del Rasperry Pi . . . . .	38
3.11	Rappresentazione grafica errore assoluto dei tre sensori . . . . .	39
3.12	Rappresentazione temperatura media della cella nel giorno 26 Ottobre . . . . .	40
3.13	Rappresentazione temperatura media della cella nel giorno 28 Ottobre . . . . .	41
4.1	Modello 3D SketchUp . . . . .	44
4.2	Modello circuito RC considerato [28] . . . . .	46
4.3	Schedule dell'Heater e dello stato dei vetri . . . . .	50
4.4	Dataset di input (autunno/inverno) . . . . .	51
4.5	Dataset di input (primavera/estate) . . . . .	51
4.6	Simulated Response Comparison (autunno/inverno) . . . . .	53
4.7	Simulated Response Comparison (primavera/estate) . . . . .	54
5.1	Valori soglia Controllo Rad 500 . . . . .	56
5.2	Valori soglia Controllo Rad 300 . . . . .	57
5.3	Valori soglia Controllo Temperature . . . . .	58
5.4	Schema cella per controllo Daylight . . . . .	59
5.5	Albero decisionale per il Controllo sul Daylight . . . . .	60
5.6	Albero decisionale per il Controllo sul Glare . . . . .	62
5.7	Albero decisionale per il Controllo Totale . . . . .	63
5.8	Albero decisionale per il <i>Predictive Rule-Based Control Temperature</i> . . . . .	64
5.9	Albero decisionale per il <i>Predictive Rule-Based Control Totale</i> . . . . .	65
5.10	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500 Control</i> Gennaio . . . . .	68
5.11	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500 Control</i> Profilo temperature Gennaio . . . . .	68
5.12	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Gennaio . . . . .	69
5.13	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Profilo temperature Gennaio . . . . .	69
5.14	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature Control</i> Gennaio . . . . .	70
5.15	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature Control</i> Profilo temperature Gennaio . . . . .	70

5.16	Predictive Rule-Based Control-enhanced Temperature Gennaio . . .	71
5.17	Predictive Rule-Based Control-enhanced Temperature Profilo temperatura Gennaio . . . . .	71
5.18	Predictive Rule-Based Control-enhanced Totale Gennaio . . . . .	72
5.19	Predictive Rule-Based Control-enhanced Totale Profilo temperatura Gennaio . . . . .	72
5.20	Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Gennaio . . . . .	73
5.21	Confronto parametri per il comfort termico e visivo Gennaio . . . . .	74
5.22	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500 Control</i> Marzo . . . . .	75
5.23	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500 Control</i> Profilo temperature Marzo . . . . .	75
5.24	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Marzo . . . . .	76
5.25	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Profilo temperature Marzo . . . . .	76
5.26	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature Control</i> Marzo . . . . .	77
5.27	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature Control</i> Profilo temperature Marzo . . . . .	77
5.28	Predictive Rule-Based Control Temperature Marzo . . . . .	78
5.29	Predictive Rule-Based Control Temperature Profilo temperature Marzo	78
5.30	Predictive Rule-Based Control Totale Marzo . . . . .	79
5.31	Predictive Rule-Based Control Totale Profilo temperature Marzo . .	79
5.32	Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Marzo	80
5.33	Confronto parametri per il comfort termico e visivo Marzo . . . . .	81
5.34	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500 Control</i> Giugno . . . . .	82
5.35	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500 Control</i> Profilo di temperatura Giugno . . . . .	82
5.36	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Giugno . . . . .	83
5.37	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Profilo di temperatura Giugno . . . . .	83
5.38	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature Control</i> Giugno . . . . .	84
5.39	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature Control</i> Profilo di temperatura Giugno . . . . .	84
5.40	Predictive Rule-Based Control Temperature Giugno . . . . .	85

5.41	Predictive Rule-Based Control Temperature Profilo temperature Giugno . . . . .	85
5.42	Predictive Rule-Based Control Totale Giugno . . . . .	86
5.43	Predictive Rule-Based Control Totale Profilo temperature Giugno . . . . .	86
5.44	Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Giugno . . . . .	87
5.45	Confronto parametri per il comfort termico e visivo Giugno . . . . .	88
5.46	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500</i> <i>Control</i> Ottobre . . . . .	89
5.47	Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente <i>Rad 500</i> <i>Control</i> Profilo temperature Ottobre . . . . .	89
5.48	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Ottobre . . . . .	90
5.49	Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale <i>Glare Control</i> Profilo temperature Ottobre . . . . .	90
5.50	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature</i> <i>Control</i> Ottobre . . . . .	91
5.51	Rule Base Control basato sulla temperatura interna <i>Temperature</i> <i>Control</i> Profilo temperature Ottobre . . . . .	91
5.52	Predictive Rule-Based Control Temperature Ottobre . . . . .	92
5.53	Predictive Rule-Based Control Temperature Profilo temperature Ottobre . . . . .	92
5.54	Predictive Rule-Based Control Totale Ottobre . . . . .	93
5.55	Predictive Rule-Based Control Totale Profilo temperature Ottobre . . . . .	93
5.56	Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Ottobre . . . . .	94
5.57	Confronto parametri per il comfort termico e visivo Ottobre . . . . .	95
5.58	Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento annuo . . . . .	96
5.59	Confronto parametri per il comfort termico e visivo annuo . . . . .	97
6.1	Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Gennaio . . . . .	100
6.2	Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Marzo . . . . .	101
6.3	Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Giugno . . . . .	101
6.4	Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Ottobre . . . . .	102
6.5	Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Annuale . . . . .	102



# Chapter 1

## Introduzione

Il cambiamento climatico ed il fenomeno del riscaldamento globale sono i temi principali sui quali si sviluppano gli obiettivi dell'Unione Europea per lo sviluppo sostenibile in modo da poter limitare il consumo di energia, con la conseguente riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera.

Il Quadro 2030 per il clima e l'energia comprende obiettivi a livello europeo per il periodo tra il 2021 ed il 2030 e prevede una riduzione del 40% delle emissioni di gas a effetto serra, una quota del 32% di energia rinnovabile ed un miglioramento del 32,5% dell'efficienza energetica [1]. Il settore edilizio in particolare è responsabile del 40% del consumo totale di energia dell'Unione Europea, in particolare in Italia il 40% del consumo finale di energia è causato dal settore civile, di cui circa il 30% è utilizzato dal residenziale.

La Direttiva 2010/31/EU EPBD (Energy Performance of Building Directive Recast) [2] che sostituisce la Direttiva del 2002, la quale è stata poi aggiornata nel 2018 con la Direttiva 2018/844 [3] afferma che entro il 31 Dicembre 2020 tutti i nuovi edifici costruiti dovranno essere 'Edifici ad energia quasi zero' (Nearly Zero Energy Building, NZEB). La direttiva fornisce anche la definizione di NZEB che risulta essere 'per edificio a energia quasi zero si intende un edificio ad alte prestazioni energetiche, come stabilito in conformità dell'allegato I. La quantità di energia necessaria deve essere quasi zero o molto bassa ed inoltre coperta in misura molto significativa dall'energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotte in loco o nelle vicinanze' [2]. L'obiettivo per i prossimi anni sarà quello di trovare delle soluzioni tecnologiche che permettano di aumentare l'efficienza energetica e di favorire lo sviluppo di risorse energetiche rinnovabili per realizzare i traguardi fissati dal Quadro 2030.

Il fabbisogno energetico degli edifici può essere ridotto tenendo in considerazione diversi fattori quali le prestazioni dell'involucro, opaco e trasparente, l'efficienza della centrale termica, le abitudini degli occupanti ed andando quindi ad intervenire sia a livello strutturale sull'involucro, sia sugli impianti di climatizzazione presenti.

Ad oggi sono presenti varie misure di efficientamento per l'involucro opaco, invece per i componenti trasparenti negli ultimi anni si stanno sviluppando tecnologie innovative 'smart glazing'.

Le finestre sono direttamente collegate al comfort luminoso, termico e provvedono anche alla visuale sugli ambienti esterni, al ricambio d'aria, al comfort acustico [4]. Il componente vetrato ideale è definito come una facciata (façade) che è in grado di minimizzare l'uso totale di energia nello spazio interno, mentre contemporaneamente migliora il livello di qualità dell'ambiente interno, adattando le proprietà termo-ottiche alle condizioni ambientali esterne ed interne. Questo è possibile modulando le proprietà termo-ottiche in modo da controllare ed intervenire sugli scambi di energia e di massa tramite un metodo selettivo [5]. Ad esempio, le proprietà della finestra devono essere in grado di variare a seconda della stagione: in inverno il componente deve massimizzare la radiazione solare entrante, per sfruttare al massimo gli apporti solari, riducendo le perdite per trasmissione ma non il comfort visivo con l'abbagliamento; in estate invece la finestra deve cercare di sfruttare al massimo la radiazione solare luminosa per l'illuminazione dell'ambiente senza provocare surriscaldamento dello stesso. Dunque, per soddisfare tali esigenze si deve far utilizzo di tecnologie adattive intelligenti.

Ad oggi esistono varie tipologie di componenti vetrati attivi, ma il più sviluppato è sicuramente il vetro elettrocromico, il quale è in grado di modificare la propria colorazione se sottoposto ad uno stimolo elettrico che può essere controllato sia da un utente finale che da un sistema di Building Management System (BMS), in base ai requisiti di performance dell'edificio che si vogliono rispettare.

## 1.1 Motivazioni

Negli ultimi anni, a causa del cambiamento climatico e del fenomeno del riscaldamento globale, si è iniziata a sentire l'urgenza di definire una riduzione drastica del consumo energetico. I componenti vetrati sono considerati l'elemento debole dell'involucro edilizio, perciò sono state create delle soluzioni dinamiche, che in base alle condizioni esterne, cambiano le proprie caratteristiche per migliorare la performance energetica [6]. Recentemente è stato dimostrato che l'efficienza energetica di tali tecnologie innovative è fortemente influenzata dalla strategia di controllo utilizzata [6, 4]. Gli algoritmi di controllo più sviluppati ed utilizzati si basano sulla temperatura dell'aria interna, sulla radiazione solare incidente o sull'occupazione dell'edificio. I componenti innovativi non sono semplici da controllare, poiché devono riuscire a bilanciare e soddisfare una serie di requisiti prestazionali differenti come ad esempio il comfort termico e visivo contemporaneamente. L'obiettivo è quello di riuscire a diminuire la distanza causata dai diversi indici di performance energetica con dei controlli innovativi.

## 1.2 Obiettivi

Lo scopo principale di questo lavoro è lo sviluppo di diverse strategie di controllo per i vetri elettrocromici, pensate per essere implementate in campo. Le strategie di controllo sono pensate per riuscire a garantire contemporaneamente comfort visivo e comfort termico. Riuscendo a cambiare le proprietà ottiche dei vetri si può modulare la quantità di radiazione solare entrante nell'ambiente massimizzando gli apporti gratuiti in inverno e riducendo il surriscaldamento in estate, congiuntamente adempiendo ai requisiti per il comfort visivo.

Gli obiettivi della tesi sono:

- Creazione di un modello energetico;
- Creazione di strategie di controllo per massimizzare comfort termico e visivo;
- Individuazione parametri per implementare in campo i controlli sviluppati;
- Formulazione di un modello ridotto semplificato;
- Implementazione e confronto strategie.

## 1.3 Struttura tesi

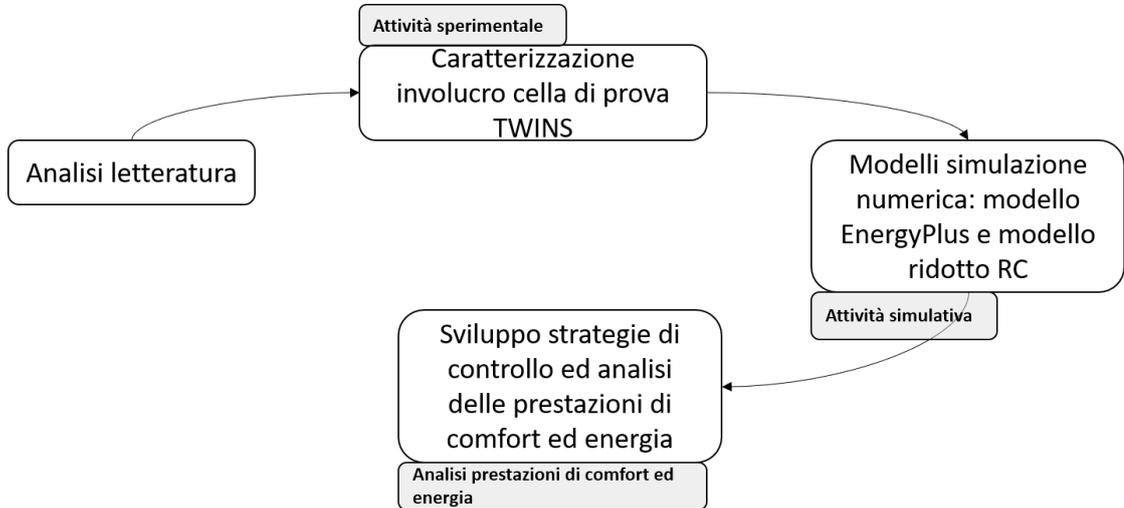
L'elaborato è composto da quattro capitoli più l'introduzione e le conclusioni.

Nel *Capitolo 2* è presentata un'analisi della letteratura, che esamina le principali tecnologie innovative ed adattive ed i sistemi di controllo analizzati. La revisione della letteratura forma le basi per lo sviluppo delle altre parti della tesi presentate.

Nel *Capitolo 3* è descritto il processo di caratterizzazione sperimentale della cella di prova, della calibrazione dei sensori utilizzati e del set up del sistema di riscaldamento. Tutti i valori ricavati ed i risultati ottenuti sono poi utilizzati per la creazione e l'ottimizzazione del modello di simulazione energetica di EnergyPlus v9.4.0.

Nel *Capitolo 4* è descritta la configurazione delle diverse parti di lavoro utilizzate per le simulazioni energetiche. Inizialmente è stato descritto lo sviluppo e il miglioramento del modello energetico su EnergyPlus. Di seguito è descritta l'identificazione del modello ridotto ricavato dai dati di output del modello energetico di EnergyPlus. Per stimare i parametri concentrati bisogna fornire dati, che sarebbero dovuti essere misurati, ma per problemi tecnici sono stati simulati, con diverse condizioni al contorno. Per estremizzare le condizioni sono state utilizzate delle *Schedule* randomiche che comportavano il cambio delle proprietà ottiche e l'accensione o lo spegnimento dell'impianto di riscaldamento ogni ora o ogni 15 minuti.

Nel *Capitolo 5* sono descritte le 8 strategie di controllo create ed implementate. Sono stati utilizzati controlli di tipo Rule Based e Model Based, in modo da poter avere una valutazione ampia dell'efficiamento energetico.



**Figure 1.1:** Workflow metodologia

# Chapter 2

## Stato dell'arte

### 2.1 Parametri caratteristici di un componente vetrato

I raggi solari consistono di radiazioni visibili e invisibili, distribuite su uno spettro di lunghezze d'onda. L'energia solare incidente è distribuita diversamente su tale spettro, in funzione della lunghezza d'onda: dei  $1360 \text{ W/m}^2$  incidenti (costante solare) circa il 43% è nello spettro del visibile ovvero tra i  $0,4\text{-}0,7 \mu\text{m}$ , circa il 52% nello spettro dell'infrarosso tra i  $0,7\text{-}2,5 \mu\text{m}$  ed il restante 5% nello spettro dell'ultravioletto ovvero tra i  $0,3\text{-}0,4 \mu\text{m}$  [7]. Per questa ragione controllare lo spettro solare invisibile usando diverse tipologie di componenti vetrati e rivestimenti, può giocare un grosso vantaggio nel risparmio energetico degli edifici.

La radiazione solare, colpendo un componente, può essere assorbita, riflessa o trasmessa; sono stati definiti degli indici adimensionali che rappresentano la percentuale di radiazione solare assorbita, riflessa o trasmessa dal componente:

- Indice di riflessione  $\rho$
- Indice di assorbimento  $\alpha$
- Indice di assorbimento  $\tau$

Inoltre, la radiazione solare assorbita dal componente è poi trasformata in calore, che causa un innalzamento della temperatura ed una seguente ri-emissione in ambiente della radiazione tramite convezione ed irraggiamento.

Per valutare la performance e caratterizzazione di un componente finestrato si fa riferimento ad i parametri di seguito elencati:

- Trasmittanza termica totale  $U \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ , la quale indica la quantità di potenza termica, per unità di superficie e di differenza di temperatura tra interno ed esterno, trasmessa attraverso l'involucro;

- Fattore solare  $g$  [-], definito come il rapporto tra la somma del flusso di radiazione solare trasmesso direttamente e la radiazione solare incidente;
- Coefficiente di trasmissione solare nel visibile  $T_{vis}$  [-], 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;
- Coefficiente di trasmissione solare nel solare  $T_{sol}$  [-], definito come il rapporto tra la radiazione solare diretta e diffusa trasmessa dal componente e la radiazione solare incidente, considerando tutto lo spettro solare;
- Indice di selettività  $K_e$  [-], che indica il rapporto tra il coefficiente di trasmissione solare nel visibile ed il fattore solare  $\frac{T_{vis}}{g}$  e può raggiungere valori compresi tra 0 e 2,33. Più è alto l'indice di selettività più il vetro in questione è performante;
- Emissività  $\epsilon$  [-], definita come il rapporto tra l'energia irraggiata da un materiale e l'energia irraggiata da un corpo nero alla stessa temperatura. È la misura della capacità di irraggiamento di un componente.

## 2.2 Tecnologie componente vetrato

Le finestre sono considerate l'“elemento debole” tra i vari componenti di un edificio [6], in quanto provoca alte perdite termiche rispetto agli altri elementi ed inoltre è anche la causa di surriscaldamenti o altri problemi legati al vetro (abbagliamento ecc.). Il confronto tra le proprietà e le caratteristiche delle finestre convenzionali e di quelle innovative è necessario per capire quale utilizzo farne in base all'ambiente in cui ci si trova ed alle proprietà esterne, in modo tale da poter massimizzare il risparmio energetico e soddisfare il comfort termico degli occupanti e dell'ambiente interno.

### 2.2.1 Tecnologie tradizionali

I sistemi vetrati tradizionali non permettono di cambiare le proprie proprietà durante l'utilizzo, perciò non possono essere utilizzate con metodi di controllo che ne massimizzano l'efficienza.

- Vetri riflettenti

Tipologia di componente vetrato chiaro o colorato, con un rivestimento solare basso-emissivo composto dal posizionamento di ossidi metallici tra due dielettrici, che permettono il passaggio di radiazione solare luminosa, filtrando la radiazione

solare infrarossa. Si produce un fenomeno di surriscaldamento ridotto, migliorando il bilancio energetico.

- Vetri colorati

Varietà di vetro al quale durante la fabbricazione sono state introdotte piccole dosi di ossidi di metallo che ne hanno determinato le proprietà ed il colore (bronzo, verde, grigio o blu) [8]. Generalmente nei vetri colorati si ha una riduzione della trasmissione solare infrarossa, ma allo stesso tempo si ha una diminuzione anche della trasmissione solare luminosa.

- Vetri selettivi

I vetri selettivi sono modificati tramite un rivestimento di ossido metallico basso-emissivo. I rivestimenti sono composti da film metallici posti tra due strati dielettrici, in questo modo si favorisce il controllo della radiazione solare infrarossa che viene in gran parte riflessa, permettendo però il passaggio di radiazione solare luminosa così da ridurre il surriscaldamento degli ambienti seppur non andando a perdere gli apporti gratuiti di luce naturale.

## 2.2.2 Tecnologie innovative

I sistemi vetrati innovativi, conosciuti come ‘smart glazing o smart windows’ possono essere definiti sulla base di diversi fattori come le proprietà ottiche, i coefficienti di trasmissione del calore, i tempi di commutazione ed altro [6]. I vetri intelligenti cambiano le proprie proprietà in seguito all’attivazione tramite uno stimolo esterno, permettono di sfruttare gli apporti gratuiti solari, di ridurre l’abbagliamento ed il surriscaldamento degli ambienti ed allo stesso tempo di favorire il comfort visivo degli occupanti. Le tecnologie attualmente esistenti possono essere divise in attive e passive a seconda del funzionamento del componente.

### Vetri Passivi

I vetri passivi sono dei componenti le quali proprietà non possono essere controllate in quanto variano in funzione di condizioni ambientali esterne, ad esempio se soggetti a calore. Appartengono a tale categoria i vetri termocromici, termotropici, fotocromici e con rivestimento PCM.

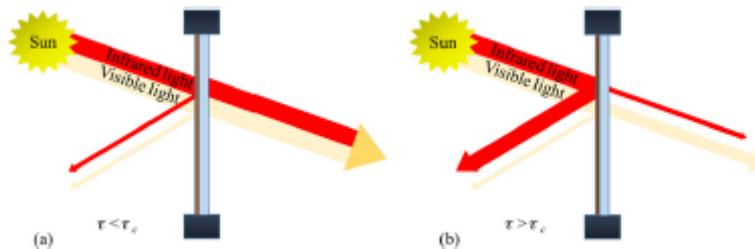
- Vetri termocromici

I vetri appartenenti alla categoria dei termocromici possiedono la proprietà di cambiare le proprietà ottiche ed il proprio colore con la variazione di temperatura, quindi con il variare della quantità di radiazione solare immessa [7]. I materiali

termocromici sono caratterizzati dalla presenza di una temperatura critica di transizione in corrispondenza della quale si ottiene la mutazione della struttura cristallina del materiale, che ne modifica le proprietà.

Quando la temperatura aumenta e si raggiunge il valore critico si ha il processo di colorazione del vetro, che si scurisce riducendo la radiazione solare trasmessa. Per valutare l'efficienza dei rivestimenti termocromici si valuta il  $\Delta T_{sol}$  definito come la differenza di radiazione solare trasmessa prima e dopo la transizione di colore. L'efficienza o abilità di modulazione solare può raggiungere valori compresi tra 0 e 1, ma solo i valori sopra il 0,1 sono considerati accettabili [7].

Nella figura sottostante è raffigurato uno schema di vetro termocromico. Il



**Figure 2.1:** Finestra TC (a) prima della transizione (b) dopo la transizione [7]

materiale più utilizzato nei vetri termocromici è il biossido di Vanadio  $VO_2$ , tuttavia ha il difetto di avere una temperatura critica di transizione molto elevata pari a  $68^\circ\text{C}$ , difficile da raggiungere e che provoca quindi difficoltà per la colorazione dei vetri. Uno svantaggio ulteriore che si può incontrare nei vetri elettrocromici è l'impossibilità di poter controllare quando modificare le proprietà, poiché può capitare che durante una giornata particolarmente soleggiata, ma rigida, il vetro si colori, diventando scuro ed impedendo il passaggio di radiazione solare che sarebbe un apporto gratuito.

- Vetri con rivestimento PCM

I PCM, phase change materials, sono sostanze in grado di assorbire e rilasciare grandi quantità di calore 'latente', durante i loro cambi di stato fisico ovvero da solido a liquido e viceversa. In [9] è stato fatto uno studio sulle implicazioni derivate dall'utilizzo di PCM nella struttura di una finestra per il comfort ambientale interno. Sin da subito l'uso dei PCM è sembrato promettente per il miglioramento della performance dei componenti vetrati, in quanto permettono di conservare grandi quantità di energia ad una temperatura costante. I PCM sono divisi in tre categorie: organici, inorganici ed un mix di diversi solidi. Studi recenti hanno dimostrato che, grazie all'utilizzo di finestra con PCM, si ottiene una riduzione della fluttuazione della temperatura dell'aria interna da  $2.7^\circ\text{C}$  a  $1.4$   $1.4^\circ\text{C}$ , e la domanda energetica durante l'inverno si è ridotta del 57% [8, 7].

- Vetri fotocromici

I vetri fotocromici hanno la proprietà di scurirsi quando sono esposti a raggi ultravioletti e di schiarirsi quando cessa l'irraggiamento. Il funzionamento consiste nella decomposizione di microcristalli di alogenuri di argento (cloruri, bromuri, ioduri), i quali sono presenti come fase dispersa nella pasta del vetro e sono i componenti sensibili ai raggi ultravioletti. Il vetro in funzione della quantità di radiazione solare incidente sulla superficie modifica la trasmissione luminosa. Come per i vetri termocromici, non potendo controllare manualmente il colore che assume il vetro, durante giornate invernali, particolarmente soleggiate si incorre nella perdita di apporti solari gratuiti.

- Vetri termotropici

I vetri termotropici sono costituiti da un fluido, formato da due componenti, il quale è posto tra due lastre di vetro o pellicole. Come per i vetri termocromici, raggiunta una temperatura critica o temperatura limite, la miscela smette di essere omogenea e trasparente e si ha la separazione dei componenti che porta lo strato a divenire bianco opaco e quindi a diffondere la radiazione solare incidente, diminuendo il passaggio della radiazione luminosa.

### **Vetri attivi**

I vetri attivi sono componenti finestrati dei quali si può controllare lo stato, in quanto le loro proprietà variano in funzione di uno stimolo esterno che varia il potenziale elettrico del materiale. I vetri appartenenti a questa categoria sono i vetri elettrocromici, i vetri LCD e SPD ed i PVCC.

- Vetri elettrocromici

I vetri elettrocromici sono basati sui materiali elettrocromici che hanno la capacità di cambiare reversibilmente il loro colore quando soggetti ad un impulso elettrico esterno [10]. Tali finestre sono interessanti in quanto permettono di regolare manualmente la radiazione solare entrante, producendo del risparmio energetico in ambiente.

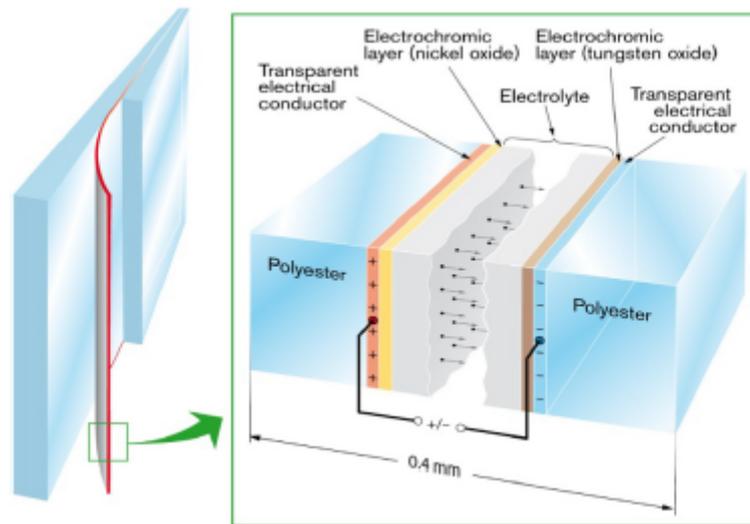
L'interesse per l'utilizzo di finestre elettrocromiche risiede nella loro capacità di soddisfare un certo livello di efficienza energetica congiuntamente al comfort degli occupanti dell'ambiente interno. Tale struttura può essere considerata come una batteria elettrica a film sottile il cui grado di carica è deducibile dalla trasparenza [11].

Lo strato elettrolita centrale del dispositivo conduce ioni ma è un isolante per gli elettroni, solitamente è composto da uno strato di un polimero elettrolita oppure

da un rivestimento trasparente inorganico ioni-conduttore. Gli ioni che si spostano all'interno dell'elettrolita devono essere piccoli, dunque sono utilizzati i protoni  $H^+$  oppure ioni di Litio  $Li^+$ .

Lo strato di ossido elettrocromico catodico ed anodico si trovano ai lati dello strato centrale e sono formati rispettivamente da ossido di Tungsteno  $WO_3$  ed ossido di Nichel NiO. In particolare, l'ossido di Nichel assorbe nello spettro blu del visibile, invece l'ossido di Tungsteno nello spettro rosso, ottenendo un colore grigio nelle condizioni del vetro scuro [12]. Questa struttura è considerabile come una pila a tre strati ed è posizionata tra due rivestimenti di conduttori elettrici trasparenti, che possono essere di vari tipi, ma generalmente sono formati da ossido a base di Indio e Stagno, date le proprietà ottiche ed elettriche performanti.

Applicando una leggera differenza di tensione di pochi Volt, circa 1-2 V, in corrente continua si ottiene un passaggio di ioni che si muovono dallo strato di ossido di Nichel per arrivare allo strato di ossido di Tungsteno, attraversando l'elettrolita.

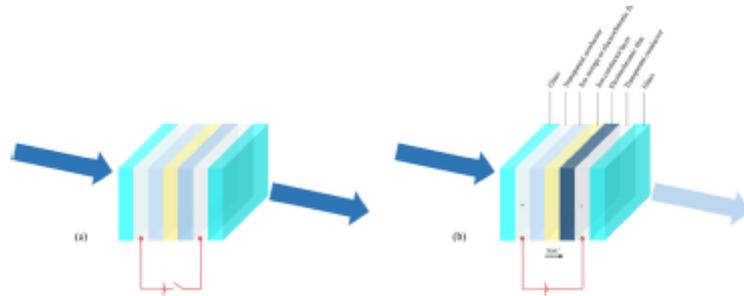


**Figure 2.2:** Schema dispositivo elettronico [11]

Come anticipato lo stato di carica della batteria è deducibile dalla trasparenza del vetro, in quanto questo assorbe attraverso lo spettro solare quando la carica è nell'ossido di W, invece è trasparente quando la carica si trova nell'ossido di Ni. Lo stato di colorazione del vetro rimane costante ed invariato se ci si trova in condizioni di circuito aperto, permettendo un consumo energetico solo quando il dispositivo cambia di stato, ottenendo quindi un miglioramento dell'efficienza energetica.

I cambi di gradazione di colore per una piccola porzione di vetro (pochi cm

quadrati) avvengono in pochi secondi, se considerassimo un vetro di dimensioni pari a quelli di una finestra si otterrebbero tempi più lunghi, dell'ordine dei minuti, che permetterebbero l'adattamento graduale della vista dell'occupante alla variazione di luce nell'ambiente [13]. La tecnologia tradizionale dei vetri elettrocromici prevede



**Figure 2.3:** Illustrazione schematica di una finestra EC (a) spenta, stato chiaro (b) accesa, stato scuro [7]

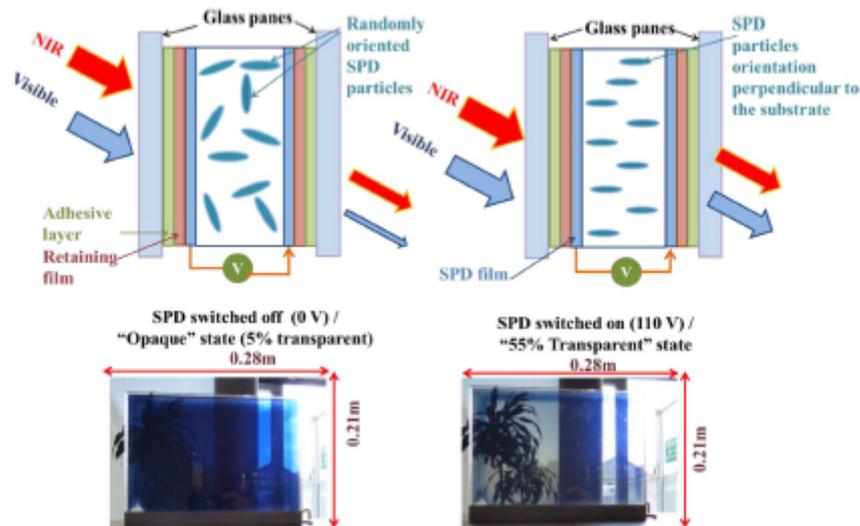
la presenza di un circuito addizionale, che sottopone lo strato elettrocromico ad una differenza di tensione, ed una potenza fornita esternamente. Nei recenti studi [10, 14] si cerca di migliorare tale aspetto dei vetri EC, implementando un metodo per ottenere potenza da poter autoconsumare direttamente dalla finestra. Tali finestre innovative vengono chiamate SP-ECW, self-powered electrochromic window, e possono cambiare le proprietà senza aver bisogno di potenza fornita addizionale, ma semplicemente utilizzando la radiazione solare raccolta, ad esempio con un sistema fotovoltaico [14] e poi convertita in potenza elettrica.

- Vetri a particelle sospese (SPD) e vetri a cristalli liquidi (LCD)

I vetri a particelle sospese ed i vetri a cristalli liquidi permettono il passaggio della luce quando è applicata loro una tensione, invece bloccano la radiazione solare in assenza di potenza applicata. La struttura dei due dispositivi è simile in quanto sono formati entrambi da due strati di plastica al cui interno si trovano due strati di un conduttore trasparente che racchiudono il materiale poroso che blocca il passaggio della luce [15].

Entrambi i vetri sono caratterizzati dal fenomeno dell'anisotropia ottica, quando è applicata una tensione agli strati conduttivi le particelle interne si allineano lungo una direzione e diventano trasparenti permettendo l'ingresso della radiazione solare luminosa. La differenza tra le due tipologie di tecnologie è la composizione chimica dello stato attivo centrale: per gli SPD si tratta di un fluido organico contenente particelle dipolari, invece per gli LCD è una matrice polimerica nella quale si ha una dispersione di cristalli liquidi [16].

Variando lo spessore del fluido organico e la densità delle particelle le proprietà termo-ottiche possono essere modulate. Lo svantaggio causato dall'utilizzo di questi



**Figure 2.4:** Illustrazione operazione vetro SPD nello stato trasparente (DX) e nello stato opaco (SX) [16, 17]

vetri è l'aumento dei consumi elettrici dovuto dalla necessità di voltaggio continuo per mantenere condizioni di massima trasparenza.

- Vetri fotovoltaici intelligenti

Le finestre fotovoltaiche intelligenti sono considerate la tecnologia 'green' più promettente al momento in quanto è in grado di integrare la potenza elettrica prodotta, al risparmio energetico ed alla protezione della privacy con un solo strumento, modulando la radiazione solare incidente [14, 18, 19].

Esistono attualmente due tipologie di finestre in base alla loro architettura ed ai componenti. Nella prima tipologia la cella contiene un componente di assorbimento che risponde agli stimoli, permettendo alla cella di cambiare reversibilmente tra uno stato altamente trasparente ed uno opaco. In questo caso la cella è in grado di risparmiare energia tramite la manipolazione della trasmissione solare più la conversione di energia solare in potenza elettrica. Il secondo caso di cella fotovoltaica consiste nell'assemblamento di celle solari e strati cromogenici, dove la cella ha solo il compito di provvedere alla conversione dell'energia, invece lo strato cromogenico modula la trasparenza in base ai cambiamenti che avvengono nell'ambiente circostante [18].

## 2.3 Strategie di controllo

Sin dagli anni '90 i ricercatori hanno studiato e creato una varietà di strumenti per la simulazione, per riuscire a stimare il consumo di energia degli edifici. Al giorno d'oggi i modelli per il consumo energetico sono parte integrante della gestione e della conservazione dell'energia. Gli studi correnti sono finalizzati alla scoperta ed alla costruzione di modelli predittivi e di strategie di controllo che possano aiutare nel migliorare l'efficienza sia degli edifici ma anche di componenti degli stessi, come ad esempio dei componenti vetrati adattivi.

Diversi autori hanno dimostrato come l'effetto delle strategie di controllo delle finestre intelligenti sul consumo energetico è ampiamente influenzato dai parametri della strategia di controllo utilizzati [20]. Attualmente il controllo dei vetri dinamici avviene principalmente tramite strategie di tipo Rule Based, dove si definiscono delle regole che soddisfano le istruzioni "if condition, then action", basate su dati misurati e valori di set point prefissati [21].

In letteratura sono presenti ulteriori sistemi di controllo per i componenti adattivi, ad esempio esistono modelli predittivi costruiti sulla base di algoritmi di controllo che fanno utilizzo di un modello dinamico fondato sulla predizione del futuro del sistema stesso ed inoltre che tengono conto delle variabili del sistema. I modelli sono di tipo simulativo, implementano logiche di controllo e sono definiti Model Based.

### 2.3.1 Rule Based Control

I modelli Rule Based sono le strategie di controllo al momento più utilizzate per i vetri dinamici, sono definiti di tipo 'controllo diretto' in quanto fanno utilizzo di sensori ed attuatori, senza tener conto di una conoscenza pregressa del sistema. Tali modelli sono fortemente dipendenti da una corretta scelta nei termini di regole e parametri associati, che generalmente sono la radiazione solare incidente, la temperatura esterna e/o interna dell'aria, la presenza di occupanti o la condizione di daylight interno [21, 22].

Nello studio di Dussault et al. [20] è stato fatto riferimento ad un edificio modello con una geometria e proprietà dei materiali predefiniti per esaminare gli effetti sul consumo energetico, provocati dall'utilizzo di differenti strategie di controllo, sul riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, sul 'thermal discomfort' e sull'effetto dello stato dei vetri dinamici sulla naturale illuminazione del piano di lavoro. Sono stati implementati due tra i metodi di controllo Rule Based più promettenti ed un modello di controllo predittivo, per essere poi comparati ad un caso di riferimento quasi ottimale basato su algoritmi generici. I risultati sono stati ottenuti ed analizzati durante i mesi di Giugno e Luglio a Montreal, Canada e mostrano come tutti e quattro i metodi di controllo sono in grado di soddisfare

il complesso bilancio energetico, avendo come controllori varie temperature di set point, sistemi di raffrescamento e riscaldamento, smart windows controllabili, variazioni di illuminazione e di carichi termici interni. I quattro metodi di controllo analizzati risultano avere valori di consumi energetici differenti, con valori che si discostano gli uni dagli altri tra il 4-10%.

Il modello Rule Based 2 è il controllo basato sulla luce diurna durante le ore di occupazione e sulla minimizzazione dei carichi di raffreddamento durante le ore di non presenza, ed ha la migliore strategia di controllo in tempo reale, presentando risultati simili a quelli del modello con l'algoritmo generico. Se invece si fa riferimento al comfort ed alla performance energetica allora il modello migliore tra quelli analizzati risulta essere quello predittivo, per la sua migliore accuratezza. I vetri elettrocromici riescono a modulare la quantità di apporti solari trasmessi, diminuendo il fabbisogno energetico nei climi caldi e l'energia richiesta per il raffrescamento.

Szymon et al. [23] hanno effettuato un'analisi piuttosto complessa che comprende due diverse configurazioni, nove stati del vetro, cinque diversi algoritmi di controllo e quattro tipologie di climi differenti. In totale hanno lavorato con 72 variabili per le quali è stato determinato il consumo energetico, il numero di ore di schermature retratte durante il daylight e l'ombreggiamento. Le strategie di controllo automatico sono cinque: 'heating/cooling' risponde allo stato del sistema di riscaldamento e raffrescamento dello spazio e assume che la radiazione trasmessa ridurrà il fabbisogno per riscaldamento; 'simple rules' è un algoritmo basato solo sulle misure di temperatura esterna e radiazione solare, la combinazione delle due variabili determina lo stato di oscuramento della finestra; 'perfect citizen' è un sistema di controllo che aggiunge a quello precedente un ulteriore parametro ovvero la temperatura interna dell'ambiente; 'heat flow' controlla lo stato dei vetri da un punto di vista energetico ed i parametri di cui tiene conto sono la temperatura esterna ed interna, la radiazione solare e lo stato del sistema HVAC; infine si ha il modello 'predictive - weather forecast based', evoluzione del metodo 'heat flow' perché utilizza gli stessi parametri, provando a predire ciò che avverrà nel futuro (ovvero lo stato dell'impianto HVAC).

L'utilizzo di algoritmi di controllo porta ad una riduzione di energia utilizzata 'in-site' tra l'11,6-13%, invece se ci si riferisce ad energia primaria si arriva ad un range del 20,1-21,6% ed i risultati migliori sono stati ottenuti dal metodo 'perfect citizen'. Se si comparano i vari algoritmi dal punto di vista del numero delle ore retratte il valore maggiore, pari a 44,3%, è ottenuto dal metodo 'simple rules', mentre le altre strategie di controllo hanno valori circa del 35%. L'utilizzo di motori, sensori e microprocessori provoca un consumo energetico addizionale che nello studio effettuato è trascurabile.

Nella pubblicazione di Lee et al. [24] sono stati caratterizzati i consumi annuali per il fabbisogno di raffreddamento e riscaldamento per un edificio di riferimento con

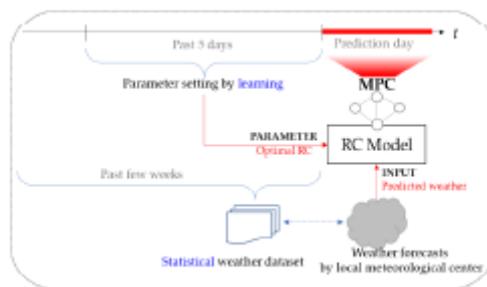
finestre elettrocromiche che possono cambiare il loro stato sulla base di parametri di controllo. Il processo di ottimizzazione è utilizzato per derivare il tipo ottimale di parametri di controllo ed il loro valore per le diverse orientazioni dei componenti finestrati e delle condizioni climatiche. La variabile esterna considerata per la strategia di controllo è la temperatura dell'aria esterna ed installando i vetri EC si riduce il fabbisogno estivo tra il 13,1% ed il 20%, invece il consumo per il riscaldamento ed il raffrescamento annuale si riduce di valori compresi tra il 13,2-21,5%. Nel caso in cui venissero analizzati edifici reali si terrebbe in conto di ulteriori parametri quali l'occupazione ed i carichi interni, inoltre potrebbe esserci la possibilità di un risparmio energetico aggiuntivo grazie alle impostazioni più accurate del sistema di unità di trattamento aria.

Tutti gli studi mostrano che si possono ottenere risultati soddisfacenti utilizzando dei controlli più semplici, anche se lo sviluppo di modelli predittivi porta ad una crescita del risparmio energetico e dell'efficienza energetica delle tecnologie utilizzate.

### 2.3.2 Model Based Control

Le strategie di controllo Model Based si avvicinano al problema di controllo diversamente rispetto al RBC. Fanno utilizzo di modelli nei quali vengono inseriti dati di input in tempo reale e sono creati schemi di controllo. I controlli Model Based, possono essere applicati anche al controllo dei componenti vetrati attivi e potenzialmente potrebbero portare ad una riduzione del consumo di energia elettrica e ad un miglioramento delle condizioni ambientali interne.

Negli ultimi anni l'applicazione di metodi di controllo predittivi (MPC – *Model Predictive Control*) sulla gestione energetica degli edifici è stato un argomento sempre più studiato dalla comunità scientifica, in quanto permette la creazione di strategie di controllo basate sulla predizione di avvenimenti futuri.



**Figure 2.5:** Schema metodologia MPC [25]

Le strategie di controllo che si basano sui modelli predittivi, tuttavia, non sono ancora completamente sviluppate a causa delle difficoltà e dei costi elevati

incontrati per creare un modello che può essere utilizzato. Ultimamente sono stati fatti progressi in questo campo, grazie alla creazione di strumenti (*tools*), nella pianificazione degli edifici, che possono aiutare nella definizione di modelli per il controller [26].

L'MPC è un controllo che fa utilizzo di modello di tipo dinamico, il quale è in grado di catturare le risposte dinamiche di un sistema con input controllati (variabili manipolate) o con input incontrollati (disturbi). I modelli risolvono il problema di ottimizzazione nel prediction horizon, applicando il controllo scelto al successivo control horizon e risolvendo nuovamente il problema di ottimizzazione per ogni intervallo di campionamento. Il controller successivamente utilizza tali risposte per creare un modello in grado di predire delle possibili risposte future del sistema. Il risultato è una traiettoria di input e stati del futuro che soddisfano le dinamiche ed i vincoli del sistema, contemporaneamente ottimizzando dei parametri. La strategia di controllo si basa sulla selezione della migliore sequenza di controllo delle variabili secondo uno specifico indice di prestazione, minimizzando la funzione di costo [27].

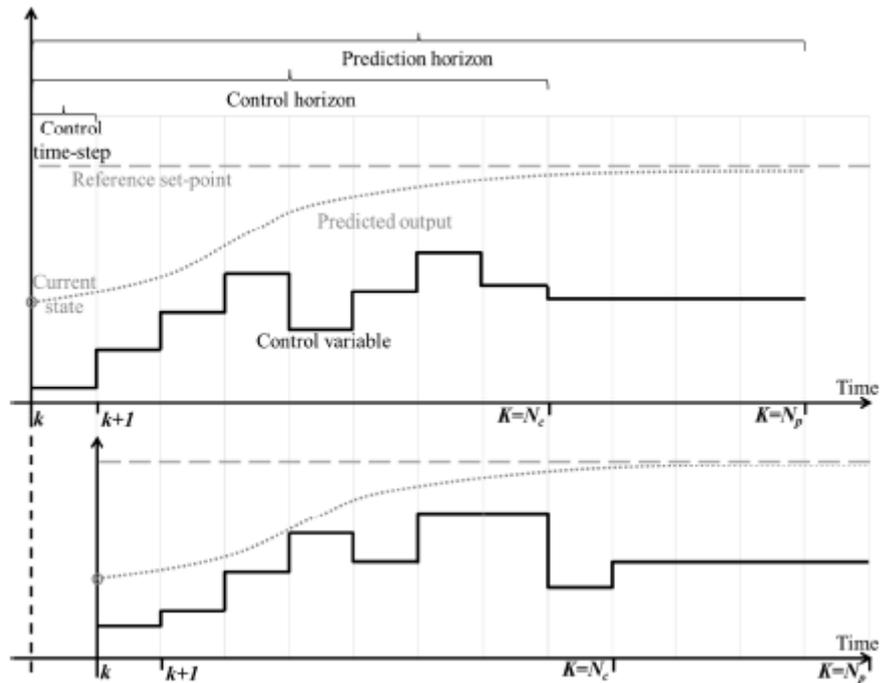
In figura 2.6 si fa riferimento a diversi parametri che descrivono il *receding horizon problem*, descritti di seguito:

- ' $k$ ' *current instant*, rappresenta l'istante di tempo attuale al quale il controller è applicato;
- ' $T_s$ ' *control time-step*, è il tempo al quale il controllo è aggiornato;
- ' $N_p$ ' *predicted horizon*, rappresenta la lontananza del futuro necessaria ad ottimizzare la funzione di costo;
- ' $N_c$ ' *control horizon*, indica il numero dei possibili valori che le variabili manipolate possono assumere in futuro.

Le strategie di controllo basate su metodi di tipo predittivo sono molto più complesse strutturalmente rispetto ai metodi rule-based. Gli MPC sono composti da più parti: le perturbazioni o disturbi, la funzione obiettivo, il receding horizon problem, le limitazioni ed i modelli di controllo orientati.

## **Perturbazioni**

I disturbi rappresentano delle variabili di input non volute, che influenzano le variabili di uscita e possono essere misurate o non misurate. Nel primo caso sono parte del modello dinamico dell'edificio, nel secondo caso hanno un effetto, ridotto o significativo, sul modello e condizionano l'accuratezza della risposta data dal modello. Le perturbazioni considerate per gli MPC applicati alla gestione degli edifici sono le condizioni climatiche, i comportamenti degli occupanti, i prezzi dell'energia ed



**Figure 2.6:** Schema del principale *receding horizon*, la differenza tra la figura sopra e quella sotto è un time-step. [27]

altri. Provocano un aumento della complessità del sistema da analizzare, ma allo stesso tempo favoriscono un miglioramento della performance del controller.

### Funzione obiettivo

La funzione obiettivo è costruita sulla base di obiettivi globali che vogliono essere raggiunti nel processo controllato. Lo scopo principale è quello di rispettare i limiti e contemporaneamente di lavorare in maniera affidabile. Lo studio dei metodi MPC, applicato agli edifici, è importante in quanto i bisogni da soddisfare sono spesso in contrasto [28]. Un esempio potrebbe essere l'aumento di trasparenza del componente vetrato, porterebbe ad un incremento della luce naturale in ambiente, quindi una diminuzione dell'uso di luce artificiale ed energia elettrica, ma allo stesso tempo, nei periodi estivi, porta ad un aumento del fabbisogno di raffrescamento. I 'drivers', ovvero gli obiettivi trainanti, generalmente sono il bisogno di comfort termico per gli occupanti, fattori economici, quali i costi operazionali, le emissioni di gas serra, la domanda energetica totale. L'intento finale della funzione obiettivo è quello di trovare un trade-off tra i vari parametri.

## Receding horizon problem

Gli intervalli di tempo devono essere scelti sulla base dei fenomeni fisici del sistema e delle caratteristiche dei componenti controllati, poiché dipendono dalla rapidità di risposta. La soluzione ottimale deve evitare che intervalli di tempo troppo brevi perché influiscono sull'affidabilità della risposta, seppur riducendo lo sforzo computazionale.

## Limiti

I limiti, chiamati '*constraints*', sono integrati nella formulazione del problema attraverso l'algoritmo di controllo. Nelle strategie MPC permettono di controllare e delimitare gli stati del sistema e le variabili manipolate di input. I limiti sono definiti come '*hard constraint*', quando è obbligatorio che il problema soddisfi tali standard, oppure come '*soft constraint*', se rappresentano dei valori flessibili, che non devono essere necessariamente rispettati. I '*boundaries*' possono essere posti sugli stati del sistema oppure sugli input al sistema. Nel primo caso sono utilizzati per occuparsi del comfort degli occupanti, ad esempio la differenza di temperatura massima che può avere la temperatura ambiente interna. Nel secondo caso si fa riferimento a limiti fisici come può essere la potenza massima e minima di una pompa o del terminale [27]. I *constraints* hanno un ruolo nella funzione di costo, perciò è associato loro un peso. Se il costo associato è maggiore, allora la soluzione del problema vedrà i limiti considerati come 'hard'.

## Modelli di controllo orientati

Negli ultimi anni si è discusso molto riguardo la selezione dei modelli da utilizzare nel controllo degli edifici. Ad oggi, i modelli sono generalmente divisi in tre categorie: white-box, grey-box e black-box [21, 27].

I modelli white-box sono di tipo descrittivo, rappresentano il modello fisico, tramite leggi dettagliate e risolvono equazioni algebriche e differenziali per stimare le dinamiche del sistema e le strategie di controllo ottimizzate. Questa tipologia di modello possiede un elevato grado di precisione, ma allo stesso tempo, a causa della quantità di dati inserita, impiega molto tempo a sviluppare e risolvere il problema. Esistono molti software basati sulle white box quali EnergyPlus, ESP-r e TRNSYS, che analizzando il consumo energetico determinano gli schemi di controllo degli edifici [29, 27].

I modelli black-box sono di tipo opposto ai white-box, sono empirici ed i parametri perdono di significato fisico. Il modello è assimilabile ad una scatola nera dalla quale escono degli output basati solo sui dati di input conosciuti, in quanto non sono noti i legami fisici presenti all'interno della scatola. Si necessita di un periodo di allenamento, o periodo di training, nel quale si istruisce il modello

a creare algoritmi decisionali sulla base di dati storici misurati del sistema fisico analizzato. Questa tipologia di modello è anche utilizzata in studi già esistenti, per determinare le strategie di controllo degli edifici per ridurre il consumo energetico e il costo dell'energia. Sono modelli facili da costruire e rapidi, ma impiegano molto tempo per essere calibrati ed allo stesso modo se non hanno avuto un training adeguato possono produrre un grosso errore di valutazione.

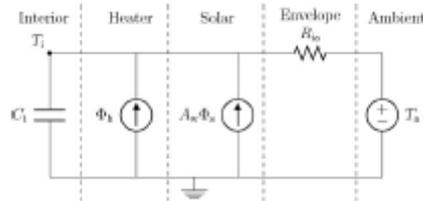
I modelli grey-box sono definiti ibridi in quanto sono concepiti come una via di mezzo tra i modelli white-box e i black-box, utilizzando leggi fisiche semplificate per simulare il comportamento sistema energetico dell'edificio. Riducono il tempo computazionale ed il tempo impiegato ad allenare il modello, usando equazioni differenziali stocastiche che descrivono gli aspetti dinamici del sistema in modo continuo [29, 30].

**Table 3**  
Comparison between white, black and grey box techniques.

Methods	Building geometry	Training data	Physical interpretation
Physical or "white box" method	A detailed description of the building geometry is required	No training data are required	Results can be interpreted in physical terms
Statistical or "black box" method	A detailed description of the geometry is not required	A large amount of training data collected over an exhaustive period of time is required	There are several difficulties to interpret results in physical terms
Hybrid or "grey box" method	A rough description of the building geometry is enough	A small amount of training data collected over a short period of time is required	Results can be interpreted in physical terms

**Figure 2.7:** Confronto tra i modelli white-box, black-box e grey-box , [30]

I modelli grey-box sono anche descritti utilizzando l'analogia esistente tra la termodinamica di un sistema e l'anologo circuito elettrico RC, dove le resistenze termiche sono indicate dai resistori e le capacità termiche da capacitance elettriche.



**Figure 2.8:** Rete RC semplice del modello  $T_i$  [31]

Nella 2.8 è presente un modello RC che rappresenta un edificio ed ogni divisione ne indica una parte differente. Le dinamiche di primo ordine del sistema sono rappresentate da equazioni differenziali stocastiche.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_{ia}C_i}(T_a - T_i) + \frac{1}{C_i}\phi_h + \frac{1}{C_i}A_w\phi_s + \sigma_i\frac{d\omega_i}{dt} \quad (2.1)$$

I parametri presenti nell'equazione stocastica di riferimento sono:

- $t$  il tempo;
- $R_{ie}$  la resistenza termica tra l'ambiente interno e l'involucro edilizio;
- $C_i$  la capacità termica interna;
- $\phi_h$  il flusso termico immesso in ambiente dall'impianto di condizionamento;
- $A_w$  l'area finestrata effettiva;
- $\phi_s$  il flusso termico derivante dalla radiazione solare;
- $T_a$  la temperatura ambiente

### 2.3.3 Applicazioni dei MPC agli edifici

In letteratura, la maggior parte delle ricerche fin'ora effettuate, presentano l'utilizzo di strategie MPC applicate al controllo degli impianti degli edifici.

Ad esempio in [32] è stato creato uno schema di pianificazione di utilizzo degli apparecchi elettronici per i controlli della gestione energetica di un edificio residenziale, approfittando del prezzo al dettaglio dell'energia elettrica variabile nel tempo. Sono formulati dei problemi di ottimizzazione ad orizzonte finito ed utilizzano il modello MPC per formulare previsioni future e risolvere il problema. L'utilizzo di strategie di controllo MPC porta ad un risparmio del costo dell'energia tra il 9 ed il 25,4%.

Gli edifici sono dei sistemi complessi da controllare a causa di tutte le variabili che devono essere prese in considerazione, quali gli occupanti, gli apparecchi elettrici, i sistemi di condizionamento e di illuminazione. Utilizzando gli MPC si può creare un modello in grado di predire l'evoluzione futura del sistema e di creare dei sistemi di azioni da effettuare [26]. Strategie di controllo quali le veneziane automatizzate e l'illuminazione controllata in base alla necessità, portano dei potenziali benefici per il risparmio energetico e contemporaneamente per il comfort termico e visivo.

Nello studio [22] Favoino et al. hanno analizzato l'influenza delle varie strategie di controllo esistenti, sulle prestazioni di un dispositivo fotovoltaico, installato in diversi climi. Il componente vetrato può essere controllato passivamente o attivamente e sono state svolte varie prove con i metodi di controllo attivi e poi confrontate con un metodo passivo. Dai risultati emerge che i metodi di controllo attivi sono da preferire a quelli passivi per la maggior parte del tempo e per tutte le tipologie climatiche esaminate. In base a queste, le strategie di controllo attive possono risparmiare energia tra il 2 ed il 12%. I risultati ottenuti per i metodi MPC mostrano un risparmio energetico compreso tra il 5 ed il 12% rispetto ad un sistema vetrato statico altamente performante, riuscendo contemporaneamente a ridurre le disparità tra gli obiettivi di prestazione che un edificio deve soddisfare.

## Comfort termico

L'obiettivo del metodo di controllo predittivo è quello di ottenere delle variabili di input controllate che sono in grado di minimizzare il consumo energetico, seppur garantendo i requisiti di comfort minimi. Il termine di valutazione utilizzato come riferimento per garantire il benessere degli occupanti è la temperatura operativa dell'aria interna, la quale è calcolata in base ad ulteriori parametri che caratterizzano il comfort termico. Nello studio [33] sono state analizzate tre strategie di controllo: la prima è una termoregolazione di tipo climatica, la seconda strategia si basa su una formulazione MPC ed infine il terzo metodo è una formulazione MPC che tiene conto del PMV nella funzione di costo. Il PMV - *predictive mean vote*, o voto medio previsto, è un indice di comfort, o di disagio termico, introdotto da Fanger, che correla la sensazione termica ad un voto relativo alla percezione dell'ambiente [34].

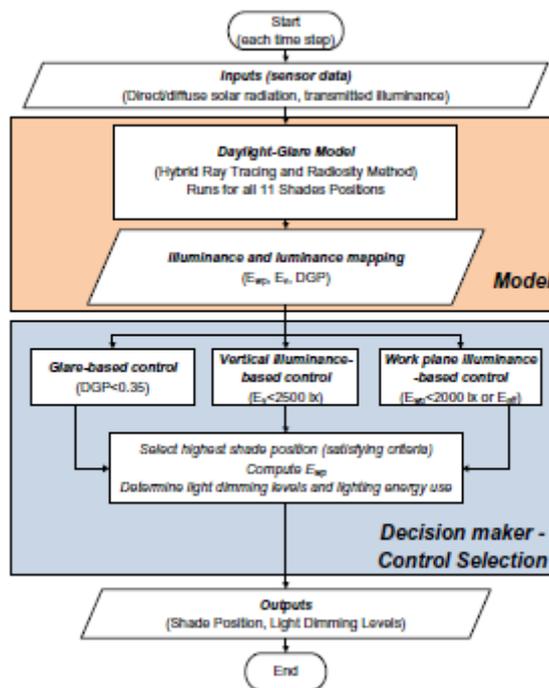
Seppure la terza strategia di controllo sia quella con il maggior risparmio energetico, pari al 10-15% in meno, congiunto ad un migliore soddisfacimento dei bisogni di comfort, i risultati annuali non si discostano di molto, ma questo è causato dal fatto che il controller del primo metodo di controllo sia stato calibrato sulle preve conoscenze del MPC. Le strategie di controllo basate sui metodi predittivi hanno delle risposte immediate ai cambiamenti improvvisi di radiazione solare e si adattano molto più facilmente.

## Comfort visivo

Lo sviluppo di metodi di controllo model based nel campo dell'illuminazione permette di rispettare i limiti per l'abbagliamento, non provocando discomfort visivo, ed allo stesso tempo consentendo il risparmio energetico. Le strategie di controllo MB possono essere anche utilizzate per controllare i componenti vetrati attivi, ad esempio utilizzando una finestra intelligente si avrebbe la possibilità di controllare la radiazione solare entrante e contemporaneamente ridurre l'abbagliamento provocato dal basso angolo azimutale della radiazione [35]. La maggior parte degli studi nel campo dei MBC riguardano i controlli sui sistemi HVAC o di comfort termico, mentre solo pochi sono stati effettuati sulle strategie per il controllo dell'illuminazione e dell'ombreggiatura (*lighting and shading control*) ed ancora meno hanno associato il comfort visivo o l'indice di abbagliamento al controllo dell'ombreggiatura. Le tre tecnologie principalmente studiate ed utilizzate sono : *roller blinds* o tenda a rullo, *venetian blinds* o veneziana ed infine *electrochromic shading* o vetrate elettrocromiche. La tenda a rullo è la tecnologia più semplice tra le tre poiché può solo cambiare posizione verticalmente, mostrando porzioni diverse della stessa facciata, a differenza della veneziana che oltre a potersi muovere verticalmente può anche cambiare l'inclinazione delle lamelle in modo da controllare meglio la radiazione solare entrante. Infine, i vetri elettrocromici sono la tecnologia

più avanzata in quanto, applicando una differenza di tensione, si può cambiare lo stato della tinta, evitando l'abbagliamento ma consentendo la visuale sull'ambiente esterno.

Le strategie di controllo dell'ombreggiamento si dividono in sistemi di controllo open-loop e closed-loop. I primi sono metodi basati su algoritmi che modificano l'output sulla base dell'input ricevuto, senza avere un meccanismo di feedback che controlla i risultati finali. E' una metodologia facile da applicare, chiamata anche *sistema di controllo manuale*, ma allo stesso tempo richiede molta attenzione nella calibrazione dei sensori utilizzati. Se si ottiene un feedback dai sensori, si passa da open-loop a closed-loop, questo è il sistema di controllo più avanzato chiamato anche *sistema di controllo automatico*. Il controller da i comandi al dispositivo di ombreggiamento sulla base di errori calcolati dalle variabili ricevute dai sensori, lo svantaggio di tale metodo è il maggior costo computazionale e la possibile instabilità del dispositivo. In [36] è stato implementato e sviluppato un metodo model-based per due uffici, basato su criteri per il comfort visivo e per le zone con sistemi di ombreggiamento interni.



**Figure 2.9:** Schema dello sviluppo del controllo MB per illuminamento ed ombreggiatura [36]

Il modello simulativo per il daylighting e l'abbagliamento richiede come input la radiazione solare visiva diffusa attraverso la finestra, calcolata per ogni intervallo di tempo e misurata attraverso dei sensori, due posti esternamente, i quali rilevano l'irraggiamento globale su superficie orizzontale e il rapporto tra radiazione solare diretta e diffusa sulla facciata, ed un sensore interno che misura l'irraggiamento solare trasmesso totale. In base ai dati raccolti è scelta una posizione del 'sistema di ombreggiamento', chiamato 'shade', e se tale collocazione non soddisfa i criteri di comfort allora lo shade rimane chiuso, invece il sistema di illuminazione può essere controllato sulla base di qualsiasi logica acquisendo ed inviando segnali di controllo. Si evince che i metodi di controllo sperimentati rispettano il valore del *Daylight Glare Probability* DGP ( $<0,35$ ), il quale indica il disturbo da abbagliamento, per la maggior parte del tempo anche nei periodi estivi, inoltre permettono di ridurre i movimenti dello shading, in modo da garantire la realizzabilità delle operazioni pratiche e l'estensione della vita utile dei componenti.

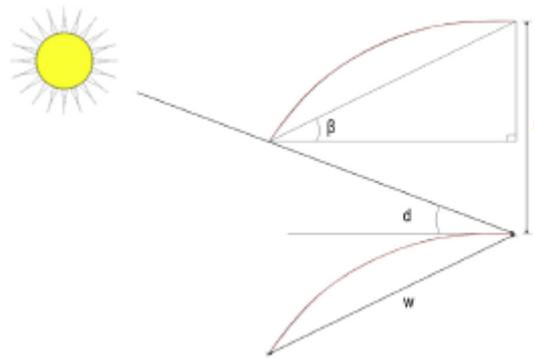
La maggior parte degli studi analizzano la strategia di controllo più utilizzata per le facciate dinamiche, ovvero le *venetian blind*. In particolare nello studio [37] vengono svolte simulazioni in differenti città per determinare il valore più appropriato dello *slat angle*, l'angolo delle lamelle, per differenti situazioni. Le variabili considerate sono le condizioni climatiche, l'orientamento dell'edificio ed il WWR o *window to wall* ratio, cioè il rapporto tra l'area dei componenti vetrati e l'area totale dell'involucro edilizio. Per valutare la performance della tecnologia utilizzata è stato fatto riferimento al DGI, *Daylight Glare Index* o indice di abbagliamento, ed alla domanda energetica per illuminamento. Considerando solo il comfort visivo, hanno ottenuto come risultato generale che l'irraggiamento deve essere compreso tra i 100 ed i 150  $[\frac{W}{m^2}]$  e l'angolo delle lamelle deve essere  $60^\circ$ . L'angolo ha un valore più elevato rispetto a quello specifico trovato per ogni condizione climatica differente (climi tropicali  $0-30^\circ$ , deserto  $30-45^\circ$ , continente umido  $45-60^\circ$ ). Nello studio [38] sono stati dimostrati i benefici derivanti da un controller che si basa su simulazioni e calcola le condizioni visive nella stanza ad ogni istante di tempo. Sono stati comparati tre metodi di controllo differenti quello creato appositamente per lo studio, la strategia *cut-off* e la *radiation control*. Secondo il metodo il metodo di controllo *cut-off* il dispositivo di ombreggiamento, a meno che la radiazione solare incidente totale orizzontale non sia minore di 200  $[\frac{W}{m^2}]$ , deve essere sempre completamente abbassato nelle ore diurne e l'angolo di inclinazione delle lamelle è calcolato sulla base dell'orientamento dell'edificio, dell'altezza solare e dell'azimut. Invece, secondo il metodo *radiation control* durante le ore di occupazione il dispositivo di ombreggiamento deve essere chiuso, compreso le lamelle, se la radiazione solare incidente la facciata è superiore a 150  $[\frac{W}{m^2}]$ .

Sono state effettuate altre analisi atte a studiare il comfort visivo degli occupanti di un ambiente, ad esempio in [39] hanno utilizzato due strategie, entrambe basate sull'utilizzo di una veneziana, ma in un caso si ha una completa chiusura delle

lamelle nelle ore in cui è elevata la radiazione solare; invece nell'altro caso si ha un controllo più dettagliato, che fa utilizzo del *cut-off angle* o di un minimo di  $15^\circ$  di inclinazione. L'angolo di cut-off è una funzione dell'angolo del sistema di veneziane utilizzate ed è stato espresso tramite due equazioni, i cui parametri sono rappresentati nella figura 2.10:

$$\beta_{cut-off} = \sin^{-1}\left(\cos(d)\frac{s}{w}\right) - d \quad (2.2)$$

$$d = \tan^{-1}\left[\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\gamma)}\right] \quad (2.3)$$



**Figure 2.10:** Illustrazione parametri inclusi nelle equazioni per il calcolo dell'angolo di cut-off [39]

L'esperimento è stato effettuato su un campione di 40 persone, alle quali si è affidato lo svolgimento di un compito da svolgere su carta e successivamente al computer. Le risposte ottenute hanno mostrato come la strategia di controllo più dettagliata è ampiamente preferita, rispetto al controllo semplice. Inoltre un fattore di cui non è stato tenuto conto per l'analisi, ma è emerso esser considerato molto importante, è la visuale che si ha sull'esterno. Più del 60% dei partecipanti hanno affermato che la vista dell'ambiente esterno ha influenzato la scelta della strategia di controllo.

Nello studio di [35] è presentata una strategia di controllo model-based degli oscuranti, in questo caso *roller shades*, basata sul criterio dell'*effective daylight*, ovvero della quantità effettiva di radiazione solare entrante in ambiente. Sono stati considerati due effetti fondamentali della radiazione entrante in ambiente: la luce che arriva sul piano di lavoro e l'eccessiva illuminazione interna. Il primo fenomeno è evitato riuscendo a controllare la posizione della tenda a rullo, che

dipende dall'orientamento e dalla posizione dell'occupante.

$$h_{sh} = D \tan(\Omega) \quad (2.4)$$

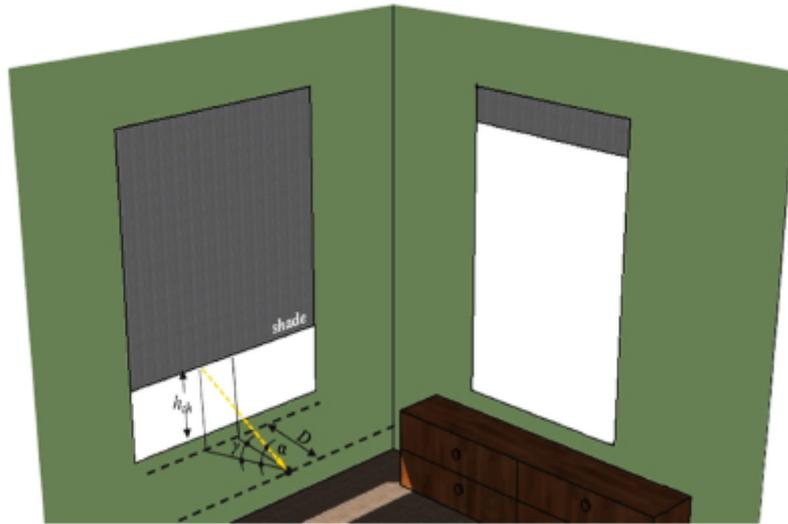
Dove  $h_{sh}$  rappresenta l'altezza della porzione di finestra non coperta dall'oscurante rispetto al piano di lavoro,  $\Omega$  è l'angolo del profilo solare, a sua volta funzione dell'altezza solare  $\alpha$  e dell'azimut  $\gamma$ .

$$\tan(\Omega) = \frac{\tan(\alpha)}{\cos(\gamma)} \quad (2.5)$$

L'effetto dell'eccessiva illuminazione è controllato fissando un valore limite accettabile dell'illuminazione sul piano di lavoro, ad esempio alcuni studi hanno dimostrato che un valore preferito da lavoratori è 2000 lux. Nell'analisi di [35] è calcolata l'*illuminazione trasmessa effettiva*, tramite correlazioni tra la radiazione passante per la finestra e l'illuminazione sul piano di lavoro.

$$E_{eff} = \frac{E_g A_g + E_{sh} A_{sh}}{A_g + A_{sh}} \quad (2.6)$$

Dove  $E_g$  e  $A_g$  rappresentano la radiazione solare trasmessa attraverso la sezione della finestra non ombreggiata e la sua area, mentre  $E_{sh}$  e  $A_{sh}$  sono la radiazione solare trasmessa attraverso la sezione della finestra ombreggiata e la sua area.



**Figure 2.11:** Schema della posizione del roller shade per la prevenzione dell'irraggiamento diretto sul piano di lavoro [35]

Lo sviluppo del metodo di controllo semplificato in questo studio ha portato a dei risultati che indicano un risparmio energetico compreso tra il 50-75%, se

confrontato con un metodo che non prevede il controllo dell'illuminazione, ed in più si è ottenuto una densità di potenza media di illuminamento minore di  $3 \frac{W}{m^2}$ .

In generale si può affermare che c'è la necessità di trovare dei valori ottimali di set-point per l'attivazione dei sistemi di ombreggiamento, inoltre bisogna essere in grado di controllare correttamente l'angolo delle lamelle o la posizione delle tende a rullo in modo da creare una robusta strategia di controllo.

## 2.4 Software di simulazione e co-simulazione energetica

Il comportamento delle smart window non può essere facilmente modellizzato, in quanto non esiste un unico software in grado di implementare i controlli dinamici utili per sfruttare al meglio questa tecnologia. L'obiettivo è riuscire a valutare le prestazioni energetiche dei componenti vetrati attivi tramite la simulazione dei comportamenti che questi hanno con diversi controllori implementati. La struttura simulativa che permette di raggiungere tale scopo è composta da tre software: EnergyPlus, dal quale si possono ricavare gli indicatori delle prestazioni energetiche di un edificio; BVCTB, che è un software di co-simulazione; ed infine Matlab che permette di implementare dei controlli più complessi come quelli predittivi.

### 2.4.1 EnergyPlus

EnergyPlus [40] è un software per la simulazione energetica dell'edificio creato e sviluppato dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America. Il modello di edificio, di cui fa utilizzo il programma, è di tipo deterministico (white-box) e necessita di tutte le caratteristiche dell'involucro, dell'impianto e dell'ambiente esterno. Le caratteristiche sono inserite tramite un editor di testo in formato .txt, altrimenti tramite l'editor apposito con formato .idf. Per caratterizzare il modello si hanno delle classi, definite *Object*, dove vengono inseriti tutti i dati necessari a far funzionare la simulazione. Gli output di EnergyPlus sono vari, si può ricavare l'energia richiesta dall'edificio, i carichi termici, si possono modellare gli impianti di HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*), di illuminazione e verificare comfort termico e visivo.

Tramite l'introduzione del linguaggio *EnergyPlus Runtime* (ERL) è possibile utilizzare ed implementare controlli su EMS (*Energy Management System*). L'EMS è in grado di modificare il modello tramite delle regole *if-else*, definite in un controllo dall'utente. La struttura base del EMS è formata da: *EnergyManagementSystem:Sensors*, sono sensori che hanno i dati di input del programma per la simulazione; *EnergyManagementSystem:Actuator*, rappresenta la parte, i dati, del modello che deve essere modificata dal controllo che si vuole implementare (in

questo lavoro, lo stato dei vetri elettrocromici); ed infine *EnergyManagmentSystem:Program* è l'algoritmo di controllo, che può essere creato solo da regole di tipo *if-else*.

L'EMS è utilizzato per effettuare dei controlli semplici, in quanto esiste un limite al numero di sottogruppi *if* che è possibile annidare. Per questo motivo si è aggiunto il software di co-simulazione BCVTB, in modo da poter utilizzare un secondo programma, come Matlab, per poter implementare controlli più complessi, come ad esempio l'MPC *Model Predictive Control*

## 2.4.2 BCVTB

BCVTB (*Buildind Controls VirtuaTest Bed*) è un software che collega differenti programmi di simulazione [41], espandendo le potenzialità dei singoli programmi di simulazione. In questo lavoro BCVTB è utilizzato come ambiente di co-simulazione per collegare Matlab ad EnergyPlus, in modo da poter implementare un metodo di controllo Model Based. Per ogni timestep EnergyPlus manda in input delle variabili prestabilite, che sono la base dell'algoritmo, quindi Matlab decide il controllo da implementare e lo invia di nuovo ad EnergyPlus.

## Chapter 3

# Caratterizzazione della cella

Nel seguente capitolo è descritta l'attività sperimentale utile alla valutazione del comportamento dell'involucro edilizio e dell'impianto associato, necessaria per la realizzazione del modello per le simulazioni energetiche.

### 3.1 Cella TWINS

La cella A delle TWINS (Testing Window Innovative System) [42] è l'oggetto delle attività sperimentali e simulative svolte in questo lavoro. Le celle sono entrambe posizionate sul tetto del laboratorio del Dipartimento di Energia, o DENERG, del Politecnico di Torino (Latitudine: 45°03'28"N; Longitudine 7°39'23"E). L'oggetto di studio, cella A, ha dimensioni interne 1.6 m, 3.5 m, 3 m, che corrispondono alle dimensioni di una facciata di un edificio utilizzato come ufficio. L'involucro della cella è formato dalle tre pareti verticali, pavimento e copertura, costituite da un pannello sandwich composto da una doppia lamiera di acciaio con uno strato isolante interno di poliuretano (spessore di circa 48 mm), solo al pavimento è stato aggiunto uno strato di linoleum per garantire una superficie calpestabile, ed una quarta facciata, esposta a sud, vetrata. La porta della cella è situata sulla facciata esposta a nord.

Dalla caratterizzazione sperimentale svolta da [12] e [43] si ricava una trasmittanza media di ogni lato dell'involucro, eccetto i componenti vetrati, di circa  $0.5 \frac{W}{m^2K}$ . La facciata sud è composta da tre finestre: la prima a partire dall'alto è un'unità statica, mentre quella centrale e quella in basso sono dispositivi elettrocromici. Il componente vetrato statico ha dimensioni 1.3 m di larghezza e 0.77 m di altezza e possiede le stesse proprietà termo-ottiche delle finestre elettrocromiche, con dimensioni 1.3 m di larghezza e 0.83 m di altezza, quando queste si trovano nello stato più chiaro disponibile.



**Figure 3.1:** Facciata Sud della cella TWINS A

### 3.1.1 Set-up sperimentale

Il set-up sperimentale della cella A consiste nella presenza di diversi sensori, un dispositivo di acquisizione dati, il DataTaker DT85 che, tramite un software ed un programma di acquisizione di cui predisposto, registra le grandezze richieste, inoltre sono anche presenti un gruppo di continuità (UPS *Uninterruptible Power Supply*, un *Energy Meter* o contatore elettrico, un Raspberry Py ed un termoventilatore elettrico (*Heater*). L'UPS è un'apparecchiatura elettrica che permette di sopperire ai salti di corrente elettrica possibili, evitando la disconnessione sia del DataTaker che del Raspberry-Py. L'Heater ha potenza 2000 W ed è collegato ad una presa elettrica attraverso un relè, che collegato al Raspberry, ne permette il controllo remoto. Per verificare la potenza dell'Heater ed il corretto funzionamento da remoto, sono state condotte delle misure sperimentali dal 19 al 23 Dicembre, durante le quali il termoventilatore è stato controllato con delle schedule i cui valori cambiavano ogni 15 minuti ogni giorno. In questo modo si è potuto verificare che l'Heater rispondesse correttamente ai controlli da schedule da remoto.

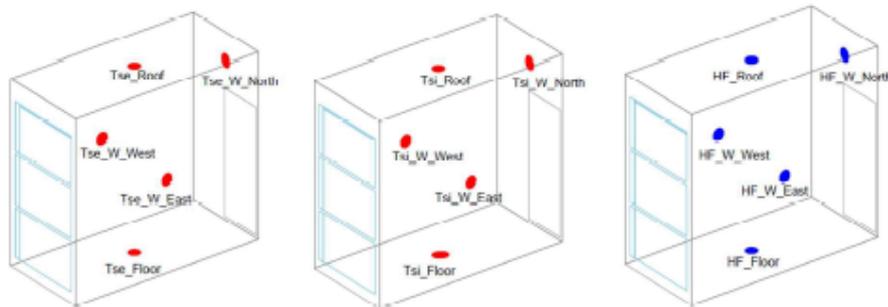
I sensori, collegati al DataTaker presenti nella cella, si differenziano in base alla grandezza fisica che si vuole valutare:

- Termocoppie di tipo  $T$ , utilizzati per misurare la temperatura superficiale di ogni componente, per la temperatura dell'ambiente interno e dell'ambiente

esterno;

- Termoflussimetri, misurano i flussi di calore passanti attraverso ogni superficie che delimita lo spazio interno dell'esterno;
- Piranometri, misurano la radiazione solare nell'ambiente esterno ed interno, orizzontalmente e verticalmente.

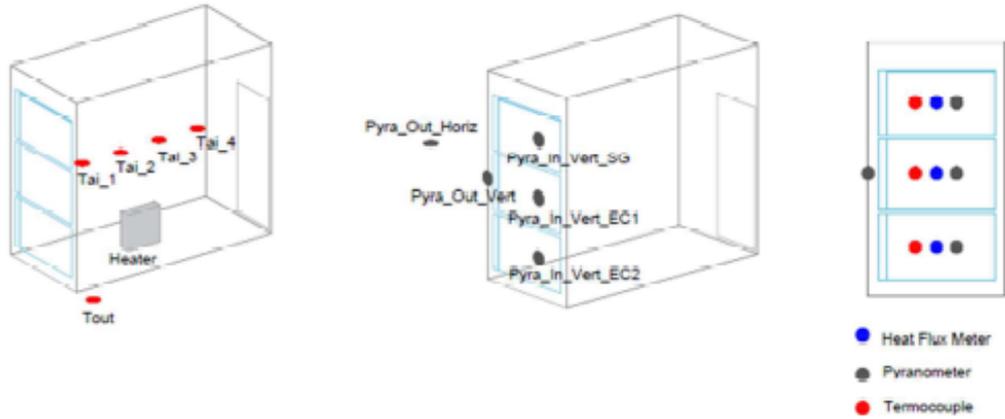
Ogni sensore è stato posto su ogni elemento interno ed esterno della cella che è stato caratterizzato. La temperatura ambiente esterna è misurata tramite una termocoppia posta esternamente all'involucro ed al di sotto di esso, in modo da essere riparato da radiazione solare diretta. Invece, la temperatura ambiente interna è misurata tramite tre termocoppie, che sono state opportunamente montate su dei supporti a circa 1.7 m di altezza, al centro della cella. I piranometri che misurano la radiazione solare passante per la facciata, sono posizionati, per ogni componente vetrato, al centro di questo. Per quanto riguarda la radiazione solare esterna sono stati collocati due piranometri, uno in posizione verticale ed uno orizzontale, in modo da riuscire a misurare sia la radiazione solare incidente che la radiazione globale orizzontale.



**Figure 3.2:** Schema sensori caratterizzazione componenti opaco

Sulla base dei procedimenti già svolti durante altre analisi sperimentali eseguite sulle TWINS [44], sono state adottate delle misure precauzionali atte ad evitare che la radiazione solare diretta o riflessa colpisce direttamente i vari sensori.

- Le termocoppie che misurano la temperatura ambiente interna sono state schermate inserendole dentro un cilindro di cartone, che permette la circolazione dell'aria ma previene l'irraggiamento diretto, come mostrato in Figura 3.5;
- Le termocoppie utilizzate per misurare la temperatura superficiale esterna sono state coperte con semi-cilindri di cartone e ricoperti con del nastro alluminato,



**Figure 3.3:** Schema sensori per la misura della temperatura interna (sinistra) e caratterizzazione vetri (destra)

invece i sensori che rilevano le temperature interne sono stati coperti con solo il nastro alluminato, come mostrato in Figura 3.4(c);

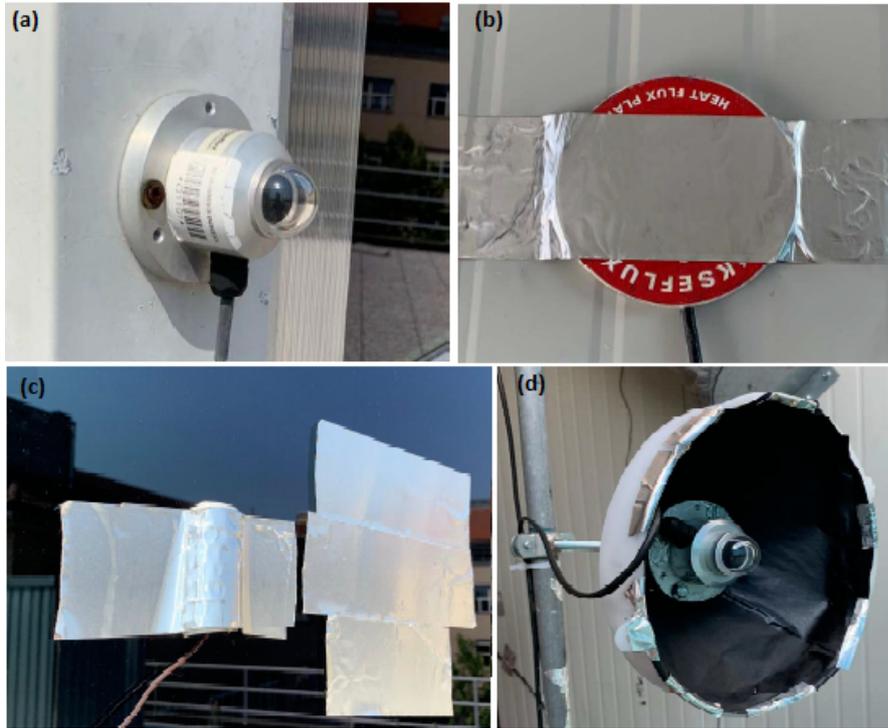
- Tutti i termoflussimetri presenti sui componenti opachi e vetrati sono stati schermati tramite il nastro alluminato come mostrato in Figura 3.4(b);
- I pirometri posizionati internamente sono stati inseriti in un imbuto internamente rivestito da un foglio nero opaco, come mostrato in Figura 3.4(d).

L'acquisizione dati è effettuata tramite il Datataker DT85, che è stato connesso alla rete locale del Politecnico di Torino per evitare perdite di dati e permettere un controllo più diretto dell'acquisizione. E' stato implementato un programma che ha permesso il salvataggio dei dati automaticamente ogni minuto su un server remoto, tramite l'utilizzo di un FTP, *File Transfer Protocol*.

### 3.1.2 Componenti trasparenti e caratterizzazione $\tau_{sol}$

L'obiettivo dell'effettuare la caratterizzazione della cella è riuscire ad individuare le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi e confermare quelle dei componenti vetrati. La misure sono state effettuate ed analizzate nei lavori precedenti [12, 28, 43] rispettando la normativa EN ISO 9869-1:2014 [45].

La parete sud possiede tre componenti vetrati, due dei quali sono sistemi elettrocromici ed uno è un vetro statico. Quest'ultimo è composto da un doppio vetro chiaro, uno esterno di spessore di 6 mm ed uno interno di 8 mm, separati da un'intercapedine di argon al 90% di 16 mm di spessore e da un rivestimento

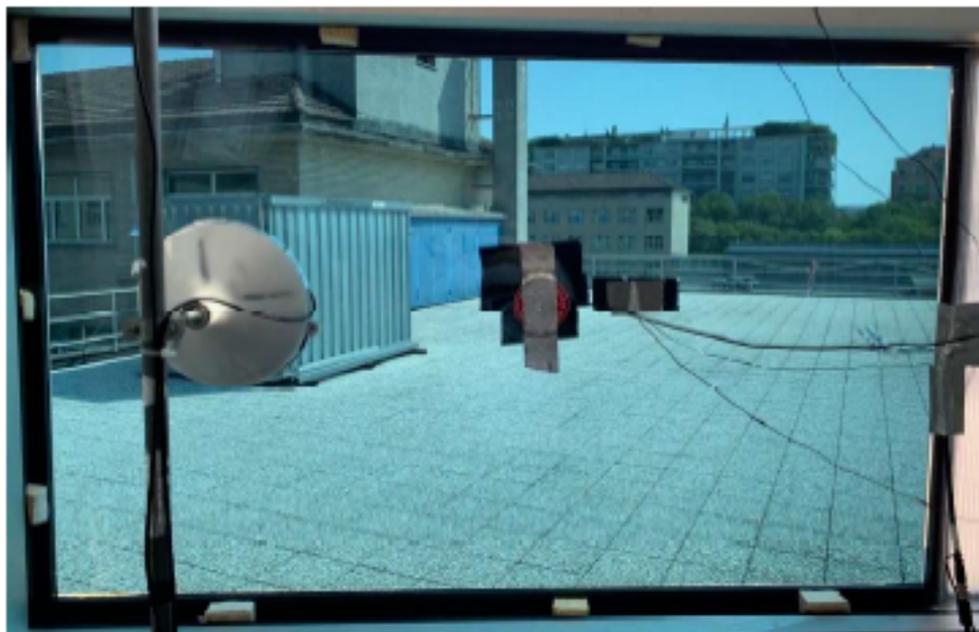


**Figure 3.4:** (a)Piranometro esterno verticale, facciata Sud;(b)Termoflussimetro interno per un componente opaco;(c)Termocoppia schermata da mezzo cilindro di cartone e nastro alluminato e nastro che scherma il termoflussimetro interno, entrambi riferiti al componente vetrato;(d)Piranometro interno

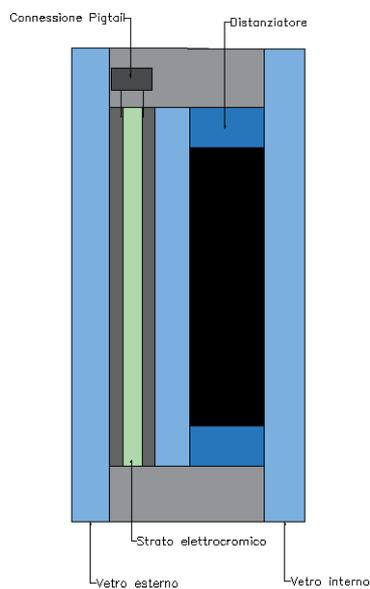
Componenti opachi	C ( $W/m^2K$ )	U ( $W/m^2K$ )
Parete Ovest	0.523	0.480
Parete Est	0.523	0.481
Parete Nord	0.523	0.480
Soffitto	0.523	0.487
Pavimento	0.816	0.696

**Table 3.1:** Trasmittanza termica dei componenti opachi

basso emissivo (low-e), inoltre ha le stesse proprietà ottiche dello stato più chiaro dei vetri elettrocromici. Questi ultimi sono strutturati come la finestra statica, ma sono formati da un doppio strato vetrato di 10 mm di spessore, al cui interno è posizionato un layer elettrocromico, un'intercapedine di argon al 90% di 15 mm ed un vetro interno spesso 4 mm con rivestimento basso emissivo.



**Figure 3.5:** Sensori utilizzati per i tre vetri. Da sinistra piranometro con schermatura, termoflussimetro e termocoppia superficiale interna ed esterna, schermate dall'esterno con nastro alluminato



**Figure 3.6:** Sezione vetro HALIO

I vetri elettrocromici hanno la capacità di cambiare stato rapidamente, in meno di 3 minuti, e possono assumere tutti gli stati intermedi che dividono lo stato più chiaro (HALIO 73) dallo stato più scuro (HALIO 2).

Per questo lavoro si è fatta la caratterizzazione di 4 stati intermedi aggiuntivi, rispetto a quelli già analizzati precedentemente. Nelle tabelle successive sono riportate le proprietà ottiche del singolo strato elettrocromico e quelle dell'intero componente vetrato.

State	$\tau_{vis}[-]$	$\rho_{vis1}[-]$	$\rho_{vis2}[-]$	$\tau_{sol}[-]$	$\rho_{sol1}[-]$	$\rho_{sol2}[-]$
EC73	0.731	0.142	0.119	0.529	0.176	0.173
EC54	0.535	0.105	0.106	0.340	0.150	0.138
EC36	0.354	0.079	0.088	0.192	0.136	0.117
EC23	0.223	0.068	0.077	0.110	0.132	0.115
EC14	0.143	0.064	0.069	0.064	0.13	0.109
EC5	0.023	0.058	0.075	0.01	0.129	0.126

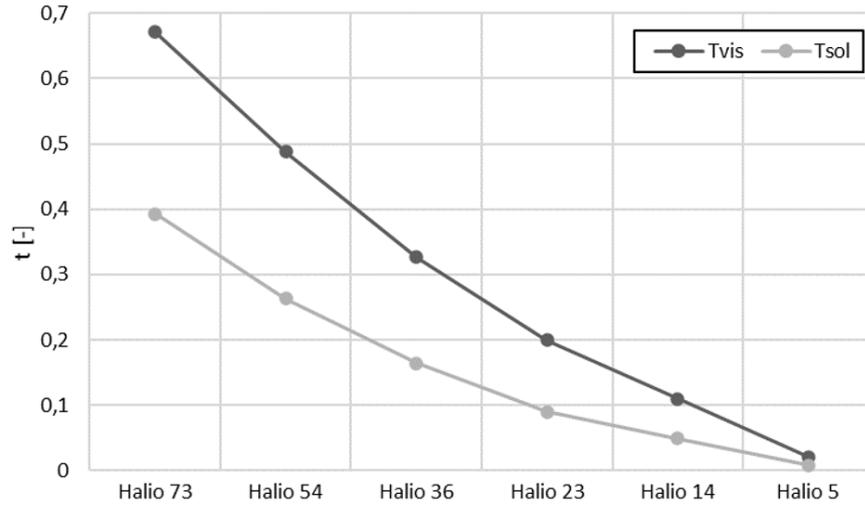
**Table 3.2:** Proprietà ottiche strato elettrocromico

State	$\tau_{vis}[-]$	$\rho_{visf}[-]$	$\rho_{visb}[-]$	$\tau_{sol}[-]$	$\rho_{solf}[-]$	$\rho_{solb}[-]$	$\mathbf{g}[-]$	$\mathbf{U} [W/m^2K]$
EC73	0.671	0.158	0.162	0.393	0.232	0.324	0.475	1.2
EC54	0.487	0.114	0.142	0.263	0.172	0.308	0.365	
EC36	0.327	0.089	0.125	0.164	0.152	0.299	0.281	
EC23	0.200	0.071	0.114	0.090	0.135	0.293	0.217	
EC14	0.110	0.065	0.107	0.049	0.137	0.293	0.182	
EC5	0.0202	0.0593	0.1011	0.008	0.1392	0.293	0.146	

**Table 3.3:** Proprietà termo-ottiche finestra elettrocromica

In Tabella 3.3 e Tabella 3.4 sono indicati valori del coefficiente di trasmissione nello spettro del visibile e del solare, i quali sono riferiti al piano normale di incidenza. Le proprietà ottiche dei vetri variano in funzione dell'angolo solare di incidenza  $\psi$ , che è l'angolo compreso tra la direzione dei raggi solari ed il piano della superficie vetrata. I coefficienti di trasmissione sono stati calcolati sperimentalmente tramite la misura della quantità di radiazione solare trasmessa attraverso ogni componente e della radiazione solare incidente sulla facciata. La formula utilizzata è stata:

$$\tau_{sol,i}(\psi) = \frac{Q_{pyravert,i}}{Q_{pyraout,vert}} \quad (3.1)$$



**Figure 3.7:** Andamento coefficiente di trasmissione per gli stati intermedi

Successivamente, grazie all’ausilio del software EnergyPlus, tramite un polinomio di quarto grado, è stato calcolato il comportamento angolare del coefficiente di trasmissione solare. L’equazione utilizzata, a partire dalla  $\tau_{sol}$  normale è:

$$\tau(\psi) = \tau_0 + \tau_1 \cos(\psi) + \tau_2 \cos^2(\psi) + \tau_3 \cos^3(\psi) + \tau_4 \cos^4(\psi) \quad (3.2)$$

I coefficienti polinomiali, riportati nella guida di EnergyPlus [40], variano in funzione della tipologia di vetro, e sono:

$\tau_i$	0	1	2	3	4
$\tau_{bnz}$	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599

**Table 3.4:** Coefficienti polinomiali  $\tau_{sol}$  [biblio]

Il valore ricavato dall’equazione polinomiale di quarto grado è poi moltiplicato per il valore di trasmittanza solare normale, dipendente solo dallo stato del vetro:

$$\tau_{sol}(\psi) = \tau(0^\circ)\tau(\psi) \quad (3.3)$$

Variando l’angolo di incidenza solare tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  si ottengono le curve per gli stati HALIO considerati in questo lavoro, riportate in Figura 3.8.

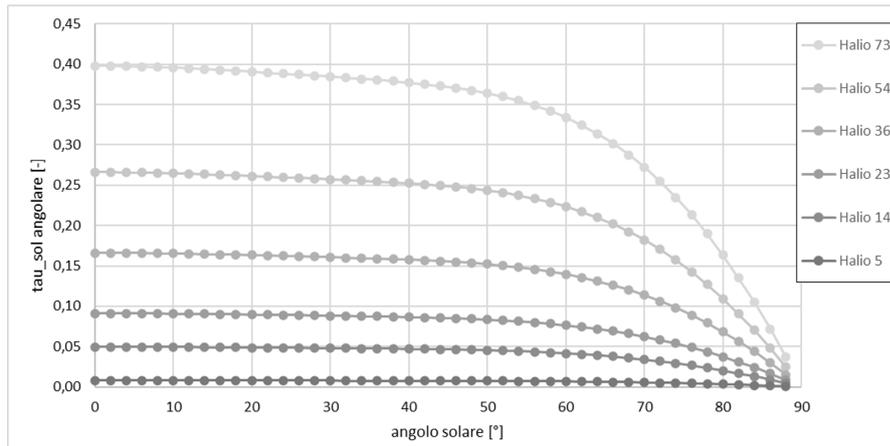


Figure 3.8: Trasmissione solare angolare dei vetri HALIO

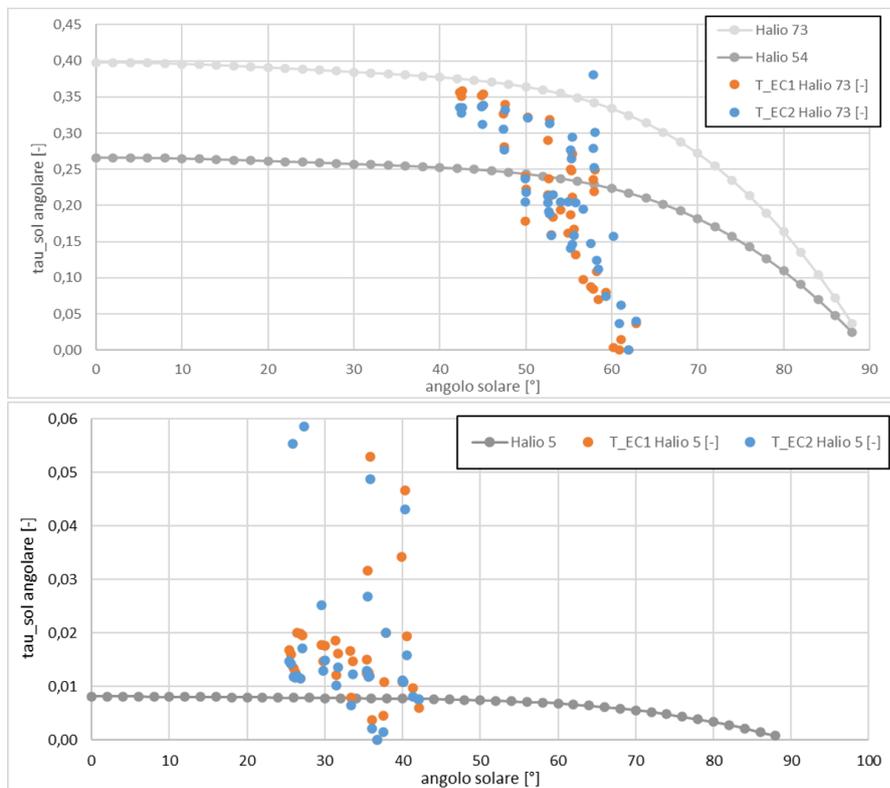


Figure 3.9: Caratterizzazione  $\tau_{sol}$ , clear state (in alto) e tinted state (in basso)

In questo modo è possibile comparare i valori misurati sperimentalmente con quelli ottenuti dalla formula teorica, in maniera tale da poter caratterizzare lo

stato assunto dai vetri elettrocromici. Bisogna specificare che alcuni valori ottenuti dalla campagna di raccolta dati possono non essere totalmente accurati a causa di vari motivi, tra i quali: un non corretto funzionamento dei vetri, inerzia nell'acquisizione della giusta tinta ed errori causati dalla considerazione di dati troppo vicini temporalmente.

I grafici riportati in Figura 3.9 fanno riferimento a dati raccolti nelle giornate tra il 12 ed il 19 Novembre 2020, con una frequenza di acquisizione di 5 minuti e media ogni 15, e rappresentano le curve ed i punti associati allo stato più chiaro *HALIO73* e più scuro *HALIO5*. Gli stati studiati seguono in linea generale le curve teoriche e per quanto riguarda le inaccurately di alcuni punti rappresentati, come già sottolineato prima, possono essere causati anche da qualche malfunzionamento dei vetri in quel periodo.

### 3.1.3 Calibrazione sensori Raspberry Pi e set up Heater

Nell'ottica di avere un ambiente termicamente controllato, che può essere paragonato ad un ufficio, la cella TWINS è stata dotata di un termoventilatore, anche chiamato *Heater*. Questo è collegato ad una presa elettrica passando per un relè, il quale è connesso a sua volta ad un Raspberry Pi. Per controllare l'accensione e lo spegnimento del sistema di riscaldamento il Raspberry Pi è munito di tre sensori di temperatura, posizionati di fianco alle termocoppie di tipo T del DataTaker, che misurano la temperatura dell'aria interna. In base al tipo di controllo che si vuole effettuare, ad esempio se si è raggiunta la temperatura di soglia prefissata, il relè si accende o si spegne.

Il primo passo effettuato è stato tarare i sensori del Raspberry Pi, confrontando i valori di temperatura misurati dai sensori, con quelli misurati dalle termocoppie del DataTaker, che essendo state calibrate nei lavori passati, possono essere assunte come un campione di riferimento. Per effettuare la taratura sono stati acquisiti e registrati dati ogni 15 minuti per due giorni, da tutti i sensori per la temperatura interna dell'aria. Sono stati confrontati graficamente i valori misurati ed è stata ricavata l'equazione per la taratura per i tre sensori del Raspberry Pi.

Successivamente è stato controllato che l'errore assoluto tra i valori misurati dai sensori tarati del Raspberry Pi e quelli misurati dalle termocoppie del DataTaker non superasse  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Questa condizione è verificata per i sensori 2 e 3, ma non per il sensore 1, che è quello posizionato più vicino alla facciata vetrata. L'ipotesi effettuata è che il sensore 1 del Raspberry Pi è posizionato sullo stesso sostegno del sensore 1 del DataTaker, ma si trova più in alto. Per questo motivo è soggetto a più radiazione solare incidente nelle ore centrali della giornata, provocando quindi un errore pari a circa  $-1.5^{\circ}\text{C}$ , come mostrato in Figura 3.11.

Effettuata la taratura dei sensori si è potuti passare al controllo del corretto funzionamento del termoventilatore, nel mantenimento di una temperatura di

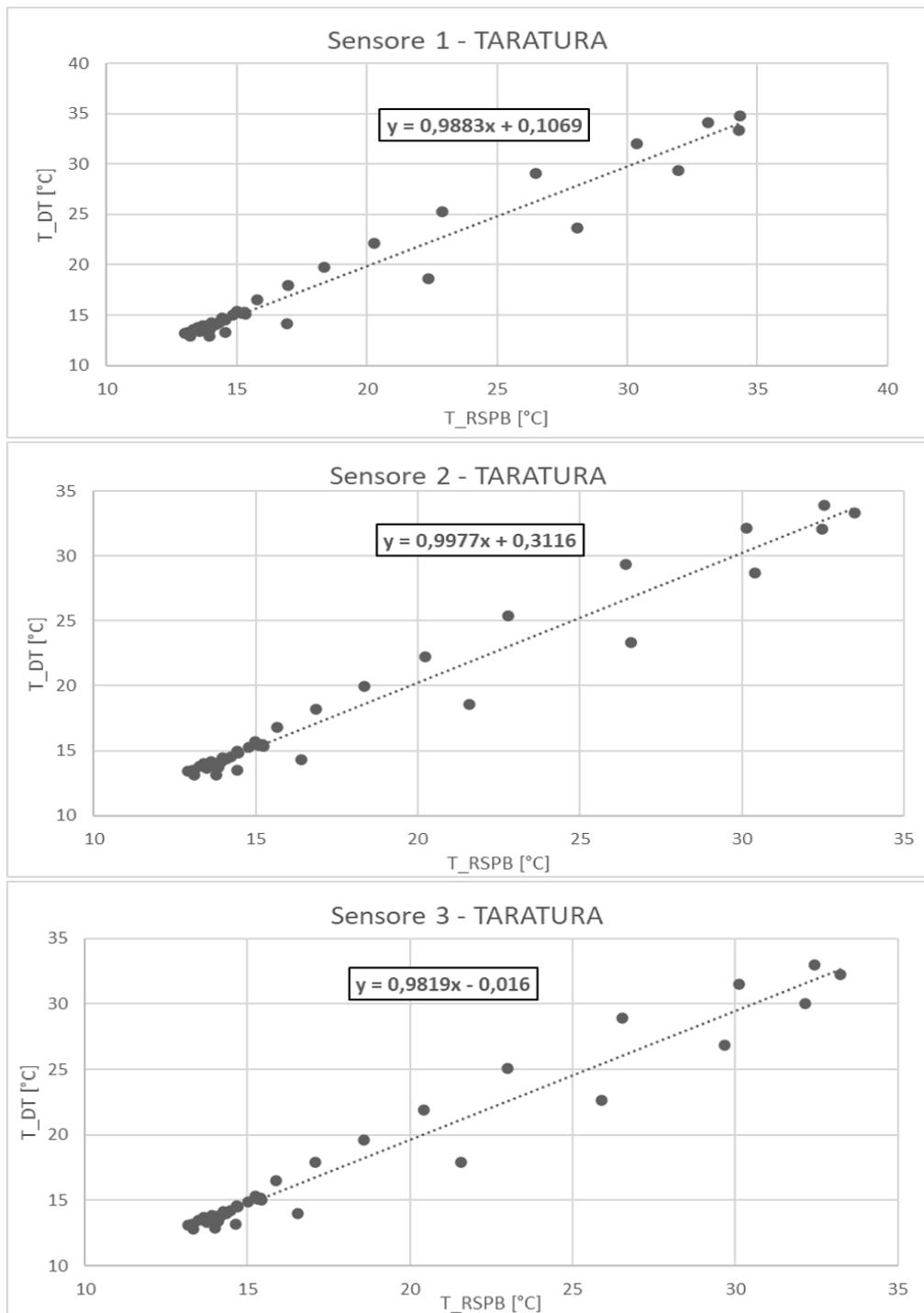


Figure 3.10: Curve di taratura delle tre termocoppie del Raspberry Pi

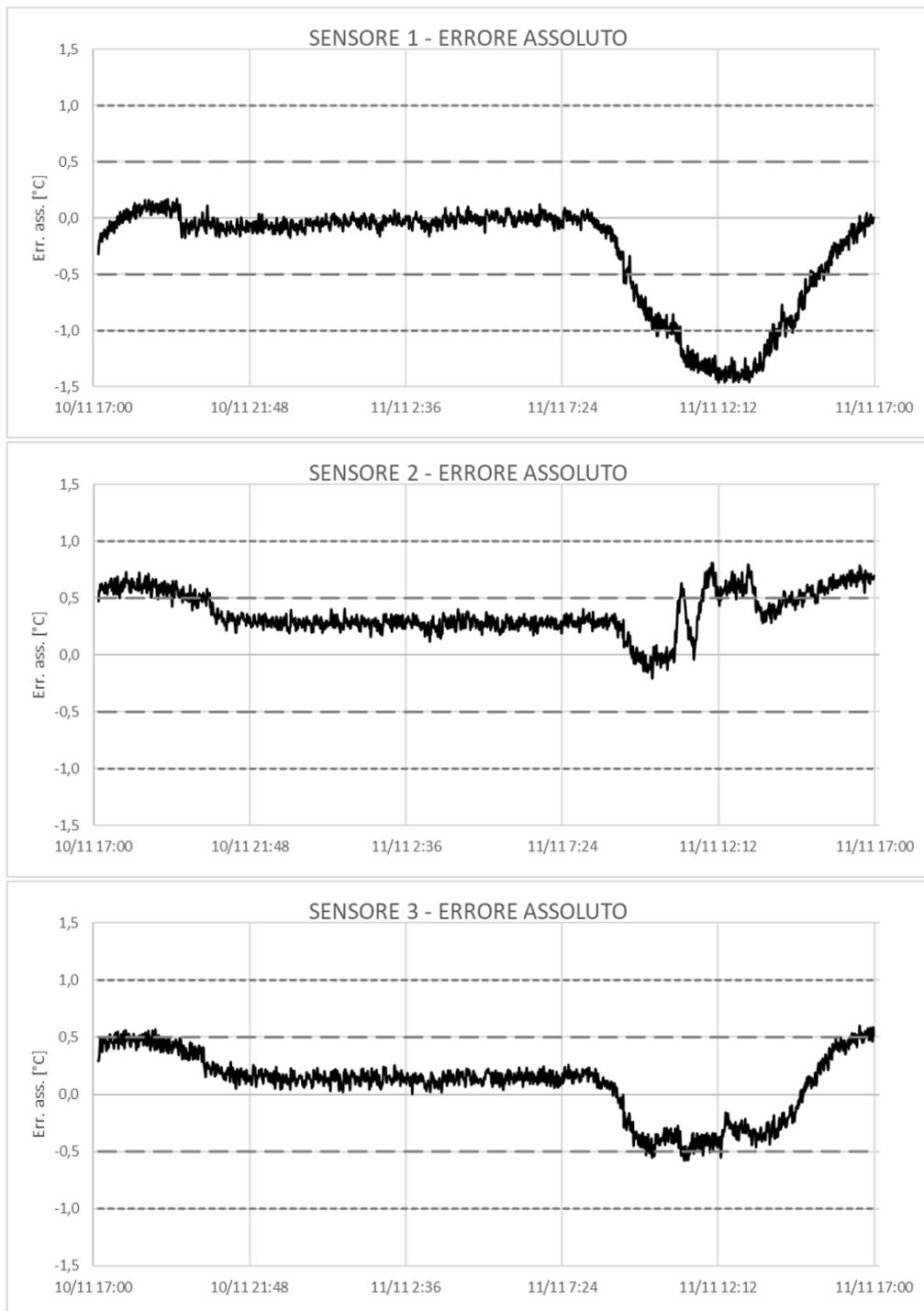
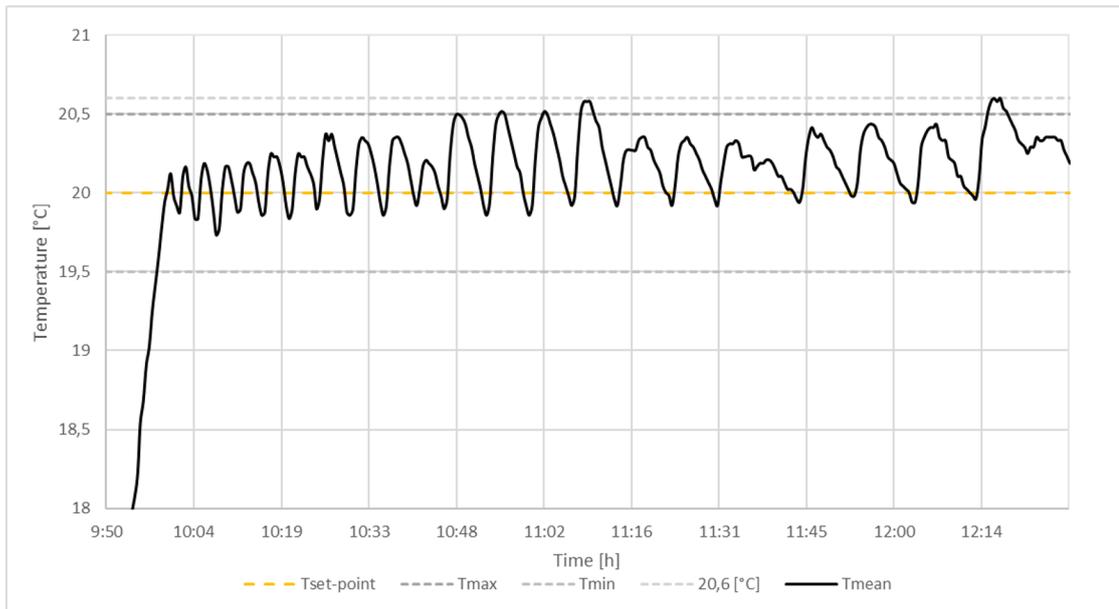


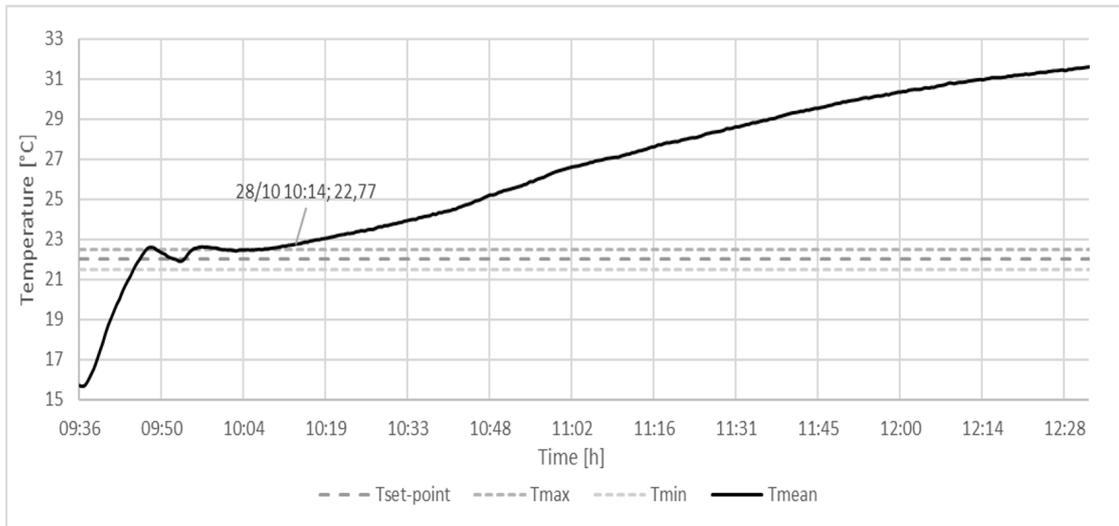
Figure 3.11: Rappresentazione grafica errore assoluto dei tre sensori

set-point all'interno della cella. E' stato implementato uno script Python sul Raspberry Pi, che registra le temperature misurate dai sensori e effettua un calcolo per ottenere la temperatura media dell'ambiente; se la temperatura media è minore della temperatura limite fissata allora il relè permette l'accensione dell'Heater, invece se la temperatura media è maggiore il relè si spegne e con esso l'Heater. Sono state messe in atto due prove con due differenti temperature limite, la prima a 20°C il giorno 26 Ottobre 2020 e la seconda a 22°C il 28 Ottobre. L'obbiettivo era mantenere la temperatura interna della cella in un range di  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Il problema principale di queste prove è stato causato dall'assenza di un sistema di raffreddamento per l'ambiente, in quanto, quando si è in presenza di giornate particolarmente soleggiate, non si riesce a controllare la temperatura, come nel caso della Figura 3.13 che ha quasi raggiunto i 33°C. Invece nella Figura 3.12 è mostrato che, nella giornata del 26 Ottobre, è stato possibile mantenere la temperatura all'interno del range di valori limite prestabiliti.



**Figure 3.12:** Rappresentazione temperatura media della cella nel giorno 26 Ottobre



**Figure 3.13:** Rappresentazione temperatura media della cella nel giorno 28 Ottobre

Controllare la temperatura interna con il termoventilatore, ha consentito di costruire un modello su EnergyPlus il cui sistema di riscaldamento, nel periodo invernale, fosse un impianto ad aria.

### 3.1.4 Correlazione tra attività sperimentale e simulativa

L'attività sperimentale descritta è stata fatta con l'intento di preparare i sensori utili all'implementazione di strategie di controllo dei vetri elettrocromici e dell'heater presenti in cella, che sono descritti in dettaglio nel Capitolo 5.

In tutti le strategie di controllo creati e nei codici sviluppati si è prestata particolare attenzione ad utilizzare variabili che potessero essere misurate in campo tramite i sensori presenti oppure rilevate in tempo reale tramite calcoli matematici effettuabili o file climatici reperibili online.

#### Controlli sulla radiazione solare

Per le strategie implementate sul controllo della radiazione solare si fa riferimento alla radiazione solare incidente sulla facciata, che nella cella A delle TWINS è misurabile tramite il piranometro esterno verticale, mostrato in Figura 3.4.

#### Controlli sulla temperatura interna

Nel controllo creato per la temperatura interna della cella, in campo reale, si possono utilizzare le termocoppie di tipo T, collegate al DataTaker.

### **Controlli sull'illuminamento verticale ed orizzontale**

Nelle strategie di controllo implementate sul Daylight e sul Glare, si fa riferimento all'illuminamento verticale ed orizzontale, che si ottengono tramite la moltiplicazione della somma tra la radiazione solare incidente sulla facciata e la radiazione solare diffusa, per dei fattori geometrici ed il coefficiente di trasmissione del componente vetrato attraversato dalla radiazione solare.

- I parametri geometrici sono noti, in quanto si tratta di grandezze fisiche misurabili sperimentalmente;
- Le costanti teoriche, come la Luminous Efficacy, che permette di convertire il flusso radiante in luminoso, sono conosciute o ricavabili dalla teoria;
- L'angolo di incidenza solare ed il fattore di copertura del cielo sono ricavabili da file climatici scaricabili da Solcast.

Per i controlli che prevedono l'unione del controllo sulla temperatura, sul glare e sul daylight è possibile creare uno script che faccia utilizzo dei valori ricavati dai sensori presenti in cella e dei valori presi dai file climatici esterni.

### **Controlli di tipo predittivo su temperatura ed illuminamento orizzontale e verticale**

Infine per quanto riguarda i controlli di tipo predittivo si procede sempre con l'utilizzo di file climatici esterni dai quali si possono ricavare le previsioni meteorologiche anche di qualche giorno futuro.

A causa di un guasto dei vetri elettrocromici tutti i controlli che dovevano essere svolti sperimentalmente sono stati simulati, ma l'utilizzo di tali variabili facilita il lavoro per l'implementazione in campo.

## Chapter 4

# Configurazione della simulazione

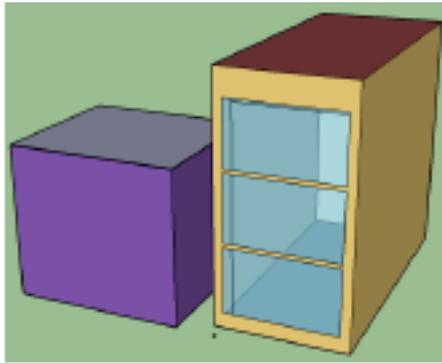
In questo capitolo è descritta la configurazione delle diverse parti di lavoro utilizzate per le simulazioni.

Innanzitutto è stato costruito il modello della cella TWINS su EnergyPlus, che è stato validato nei lavori passati [12, 43, 28] grazie al confronto di dati misurati sperimentalmente con quelli stimati dal modello stesso. Successivamente il modello di EnergyPlus è stato semplificato utilizzando un'analogia elettrica RC, al fine di ottenere l'identificazione del modello grey-box.

### 4.1 Modello EnergyPlus

E' stato sviluppato il modello della cella TWINS su EnergyPlus, inizialmente disegnato su SketchUp, successivamente caratterizzato. I modelli white-box, che rappresentando il modello fisico in modo molto dettagliato, hanno bisogno di ricevere in input tutte le misure del sistema che descrivono l'ambiente che si vuole analizzare. Un esempio, in questo lavoro, è dato dall'inserimento nel modello dell'ostruzione laterale presente ad Ovest della cella, per tenere conto dell'ombreggiamento su quella facciata. La campagna di raccolta dati ha portato alla validazione, basata sulla misura della temperatura interna dell'aria, del modello white-box.

In figura 4.1 è riportato il disegno 3D della cella.



**Figure 4.1:** Modello 3D SketchUp

Le misurazioni sono state effettuate tenendo conto della cella in free-running, ovvero senza un impianto di riscaldamento o raffrescamento, e con i vetri una volta nello stato più chiaro, HALIO 73, ed un'altra nello stato più scuro, HALIO 5. I risultati relativi alla calibrazione del modello si possono trovare nei lavori precedenti [12, 28, 43], si riportano in Tabella 4.1 i parametri statistici della validazione effettuata.

Modello	Indice statistico	Valori modello	Valori limite
Clear State	NMBE	-1.3%	$\pm 10\%$
	CV(RMSE)	5%	30%
Tinted State	NMBE	-1.7%	$\pm 10\%$
	CV(RMSE)	8%	30%

**Table 4.1:** Parametri statici modello validato

Gli indici statistici rientrano nei limiti imposti dall'ASHRAE [46], perciò il modello è stato considerato validato.

Rispetto ai lavori passati si è voluto considerare stati dei vetri differenti, variando la trasparenza dal più chiaro al più scuro del 20% per ogni stato intermedio (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%). Le proprietà ottiche e termo-ottiche inizialmente sono state ricavate per interpolazione sulla base dei valori utilizzati precedentemente, come descritto nel paragrafo 3.1.2. Successivamente i file con i valori calcolati sono stati convertiti in formato .idf per poter essere caricati come *Object* nella scheda *MaterialProperty: GlazingSpectralData* su EnergyPlus, per creare i vari stati dei vetri elettrocromici. Un'ulteriore modifica che è stata effettuata riguarda la disposizione dei vetri; per studiare in maniera migliore le strategie di controllo, soprattutto riguardanti il comfort visivo, si è deciso di considerare il vetro più in alto e quello di mezzo elettrocromici e quello in basso statico. Questa scelta è

stata fatta in quanto i metodi di controllo che scelgono lo stato del vetro in base alla radiazione solare entrante ed all'illuminamento in cella, non avrebbero avuto un effetto significativo sui risultati in quanto il vetro più in basso non si trova ad un'altezza utile per i controlli.

Inoltre, si è deciso di inserire nel modello l'impianto di riscaldamento in due modalità, in base alle simulazioni che sono state condotte. Per la raccolta del dataset utile alla creazione del grey-box si è considerato l'Heater come quello presente in cella, ovvero un termoventilatore connesso ad una presa elettrica, il cui accensione e lo spegnimento possono essere controllati da remoto tramite uno script. E' stato inserito nel modello tramite la scheda *Other Equipment*, che permette di specificare la schedule considerata, la tipologia di carburante (in questo caso l'energia elettrica) e la potenza nominale, il cui valore è stato verificato sperimentalmente grazie all'Energy Meter, che collegato al Raspberry Pi misura e registra vari parametri del termoventilatore tra cui i valori di energia e potenza.

Per quanto riguarda le analisi effettuate per la verifica delle diverse strategie di controllo implementate, descritte nel Capitolo 5, si è preferito considerare l'Heater come un impianto di riscaldamento ad aria. La scheda utilizzata è *HVACTemplate:Zone:IdealLoadAirSystem*, nella quale si specifica la schedule seguita dall'impianto e la temperatura di set-point che si vuole rispettare. Il motivo di tale scelta è stato dato dalle prove effettuate con l'Heater, per controllare il corretto mantenimento della temperatura limite in cella, i cui risultati sono mostrati nel paragrafo 3.1.3. I risultati mostrano che se la giornata non è molto soleggiata la temperatura si riesce a mantenere entro un determinato valore, stessa situazione che si creerebbe con un impianto di riscaldamento tradizionale ad aria.

Si precisa che, anche nel secondo caso, l'energia per il sistema di riscaldamento è considerata energia elettrica, in quanto l'impianto di riscaldamento, considerando il caso reale della cella di prova, è costituito da un termoventilatore collegato alla presa elettrica. Questa assunzione permette poi di sommare nei risultati l'energia elettrica spesa per il riscaldamento a quella spesa per il sistema di illuminazione.

## 4.2 Modello semplificato

I modelli grey-box sono utilizzati spesso come modelli numerici per i metodi di controllo predittivi, *MPC*, in quanto sono in grado di esprimere bene le interazioni termiche presenti. I modelli possono essere creati utilizzando dei dataset reali, quindi attraverso una campagna di raccolta dati, oppure tramite dataset simulati. Inizialmente per questo lavoro si sarebbe dovuto creare un modello grey-box sulla base di dati raccolti sperimentalmente, ma a causa di un malfunzionamento dei componenti elettrocromici ciò non è accaduto, perciò si sono utilizzati dati simulati sul software EnergyPlus, adottando il modello validato del paragrafo precedente.

In questo paragrafo verranno descritti i passaggi e le ipotesi effettuate per la costruzione del modello ridotto, con il fine di descrivere l'andamento della temperatura interna della cella, al variare della temperatura esterna, della radiazione solare incidente e dall'impianto di riscaldamento.

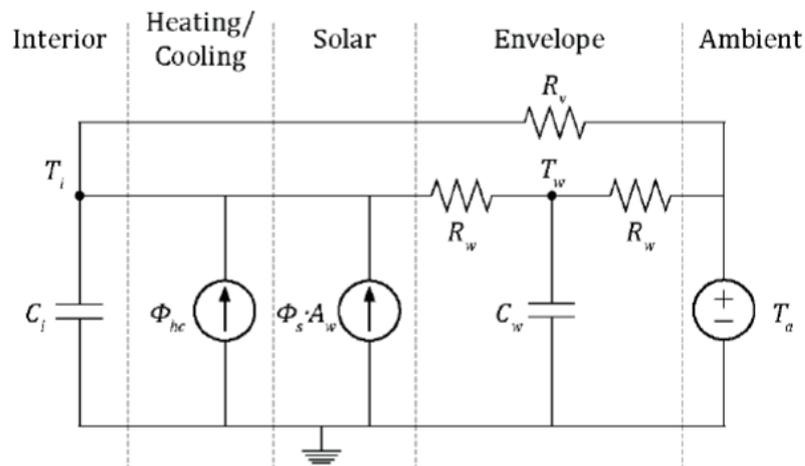
#### 4.2.1 Identificazione circuito RC

Il modello ridotto è rappresentato graficamente come un circuito elettrico RC, il cui obiettivo è rappresentare il più fedelmente possibile gli scambi termici che caratterizzano il sistema, senza complicare troppo il sistema stesso, portando ad una maggiore difficoltà nell'identificazione dei parametri.

Gli scambi termici considerati per la creazione del modello sono:

- Apporti solari entranti da componenti opachi e trasparenti;
- Trasmissione del calore attraverso i componenti opachi e trasparenti;
- Accumulo termico dei componenti dell'involucro e dell'ambiente interno;
- Apporti positivi e negativi dati dall'impianto (in questo specifico caso solo apporti positivi, in quanto è solo un impianto di riscaldamento);
- Perdite per ventilazione, infiltrazione.

Il circuito RC considerato è riportato in Figura 4.2.



**Figure 4.2:** Modello circuito RC considerato [28]

I parametri rappresentati sono:

- $C_i$ , La capacità termica equivalente dell'ambiente interno  $[\frac{kWh}{K}]$ ;

- $C_w$ , La capacità termica equivalente degli involucri opachi [ $\frac{kWh}{K}$ ];
- $T_i$ , La temperatura media dell'ambiente interno [ $^{\circ}C$ ];
- $T_w$ , La temperatura equivalente dei componenti opachi [ $^{\circ}C$ ];
- $T_a$ , La temperatura dell'aria esterna [ $^{\circ}C$ ];
- $R_v$ , La resistenza termica equivalente che tiene conto delle infiltrazioni [ $\frac{K}{kW}$ ];
- $R_w$ , La resistenza termica equivalente che tiene conto degli involucri opachi [ $\frac{K}{kW}$ ];
- $\Phi_{hc}$ , Il flusso energetico dell'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento [kWh];
- $\Phi_s$ , Il flusso energetico della radiazione solare passante per i componenti trasparenti [ $\frac{kWh}{m^2}$ ];
- $A_w$ , L'area vetrata effettiva [ $m^2$ ].

Dove gli input del sistema sono la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare e la potenza dell'impianto; i parametri caratteristici del sistema sono la resistenza e le capacità termiche e l'area del vetro; ed infine l'output del sistema, come già scritto, è la temperatura media dell'ambiente interno.

Le equazioni differenziali che descrivono il circuito RC sono:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_w C_i} (T_w - T_i) + \frac{1}{R_w C_i} (T_a - T_i) + \frac{1}{C_i} \Phi_s A_w + \frac{1}{C_i} \Phi_{hc} \quad (4.1)$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{R_w C_w} (T_i - T_w) + \frac{1}{R_w C_w} (T_a - T_w) \quad (4.2)$$

Questo sistema di equazioni può essere descritto in modo più compatto nella forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_i}{dt} \\ \frac{dT_w}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_w C_i} + \frac{1}{R_w C_i}\right) & \frac{1}{R_w C_i} \\ \frac{1}{R_w C_w} & -\frac{2}{R_w C_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_w C_i} & \frac{A_w}{C_i} & \frac{1}{C_i} \\ \frac{1}{R_w C_w} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ \Phi_s \\ \Phi_{hc} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Per la stima dei parametri si è fatto utilizzo dei risultati ricavati da una simulazione di EnergyPlus della durata di quattro settimane.

La radiazione solare passante attraverso i componenti vetrati è stata calcolata moltiplicando la radiazione solare incidente sulla facciata a Sud per il valore del coefficiente solare  $g$  del sistema vetrato.

$$\Phi_s = \Phi_{inc,sud} g^* \quad (4.4)$$

$$g^* = \frac{\sum(g_i A_i)}{A_{w,tot}} \quad (4.5)$$

Dove il coefficiente solare  $g$  è calcolato come la media ponderata dei singoli g-value dei tre componenti vetrati sulla rispettiva superficie. I valori dei g-value sono riportati in Tabella 4.2.

Stati HALIO	g-value
EC73	0.468
EC54	0.229
EC36	0.150
EC23	0.116
EC14	0.102
EC5	0.087

**Table 4.2:** Stati dei vetri elettrocromici e g-value associato

Utilizzando un valore medio per lo g-value si può lavorare su un modello RC continuo che permette di collegare direttamente lo stato del vetro alla grandezza fisica. Al contrario se non si fosse considerato il valore medio si sarebbero dovute calcolare matrici diverse per ogni stato assunto dal vetro.

#### 4.2.2 Dati di input e stima parametri concentrati

Nella costruzione del modello ridotto si fa utilizzo di un dataset, che può essere ricavato da dati sperimentali o simulati e descrive il comportamento del modello in diverse situazioni.

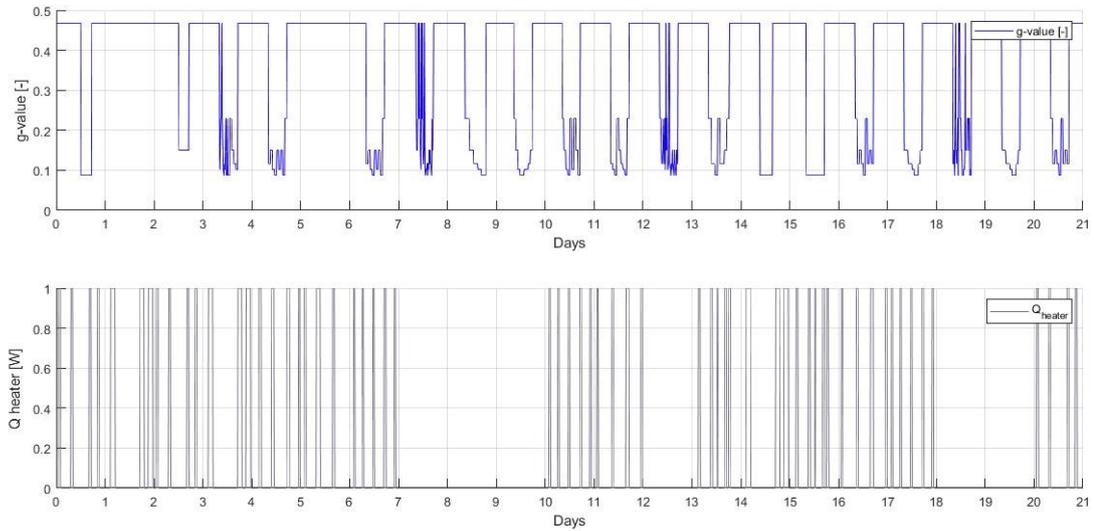
Come già scritto nei paragrafi precedenti, a causa di un malfunzionamento dei vetri elettrocromici, si è optato per l'utilizzo di un dataset simulato attraverso il modello costruito e calibrato di EnergyPlus. Sono state considerate tre settimane per l'identificazione del sistema, due utilizzate per calcolare i parametri del circuito ed una per testare la performance del modello. Volendo rispettare la stato reale ed attuale della cella si è considerato solo il sistema di riscaldamento ed il free-running.

Le variabili di input sono la temperatura interna dell'aria, la temperatura esterna dell'aria, la radiazione solare che attraversa i componenti vetrati e la potenza dell'impianto. Dunque le variabili che possono essere modificate in modo da 'allenare' al meglio il modello sono: lo stato dei vetri e la potenza termica dell'impianto. Sono state create due *Schedules*, una per l'Heater ed una per i vetri elettrocromici, con il fine di modificare il più randomicamente possibile le condizioni nelle quali si troverà il modello. Le *Schedules* assumono valori che variano con diversi intervalli, in alcuni giorni si hanno cambiamenti ogni 15 minuti, in altri giorni si hanno ogni ora. Queste variazioni sono valide sia per l'Heater che per i vetri Halio e sono tutte combinate in modo da non ottenere mai una giornata uguale ad un'altra. Solo i primi tre giorni sono tenuti con uno stato dei vetri fisso, facendo solo variare i valori della potenza dell'Heater. La potenza dell'Heater varia tra 0 e 1700 W, la potenza nominale, mentre gli stati dei vetri variano tra quelli descritti in Tabella 4.2.

Il controllo è stato implementato su EnergyPlus tramite l'utilizzo di EMS, *Energy Managment System*, che impostato su *BeginTimestepBeforePrediction* permette di cambiare i valori dello stato dei vetri e dell'Heater, impostati come *sensor*, all'inizio di ogni timestep prima che effettui i calcoli dei valori di output.

Avendo scelto di implementare i controlli su quattro settimane nelle diverse stagioni dell'anno, si sono fatte varie prove per capire quale sistema riuscisse a rappresentare meglio il modello energetico. Dopo numerose prove è stato deciso che sarebbero stati creati due modelli grey-box: uno per la stagione invernale/autunnale ed uno per la stagione primaverile/estiva.

Le *Schedules* utilizzate sono le stesse per entrambi i casi e sono rappresentate in Figura 4.3, invece in Figura 4.4 e Figura 4.5 sono rappresentati i dataset di input.



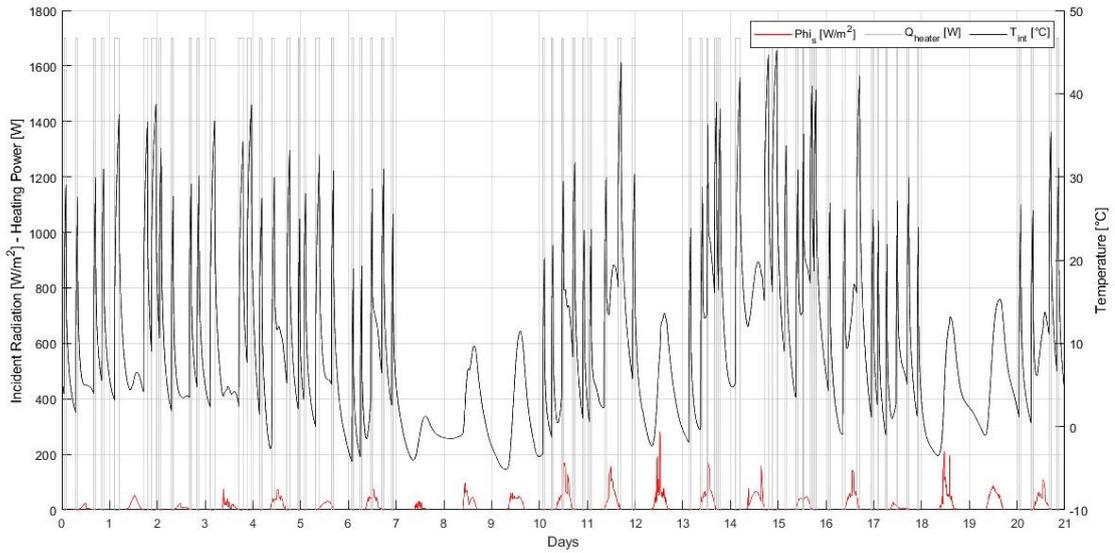
**Figure 4.3:** Schedule dell'Heater e dello stato dei vetri

Per la stima dei parametri e l'identificazione dei modelli grey-box è stato utilizzato il *Matlab System Identification Toolbox*, un programma di Matlab che stima quanto è simile il modello grey-box al dataset simulato, dando come output la radice dell'errore quadratico medio (NMRSE - Normalized Mean Root Square Error).

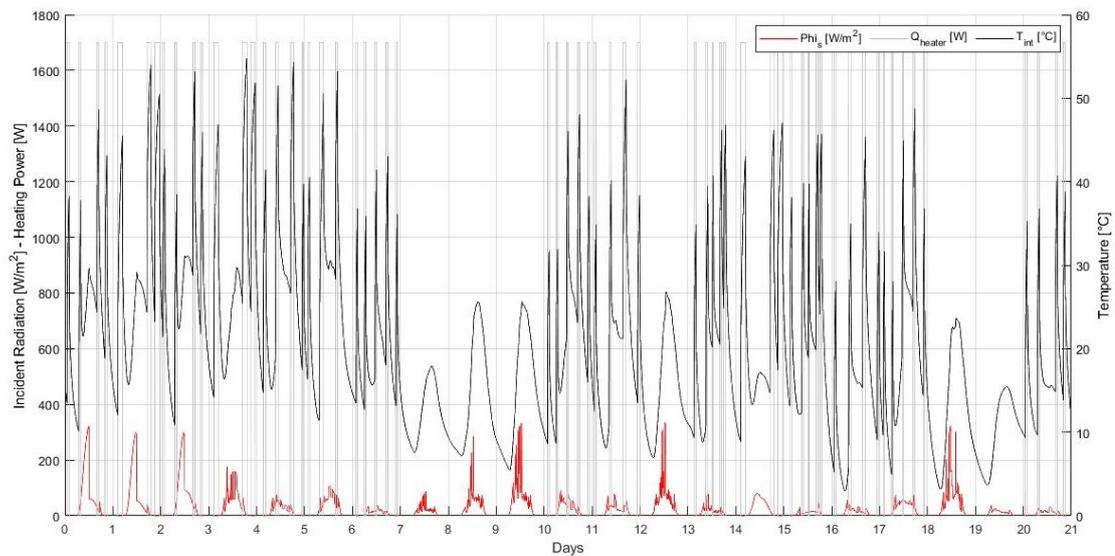
I parametri concentrati sono valutati a partire da un valore iniziale ed un range entro il quale può variare il parametro. Di seguito sono riportate le formule matematiche utilizzate per il calcolo dei parametri.

La resistenza termica dell'involucro edilizio è pari a  $[\frac{K}{kW}]$ :

$$R_i = \frac{1}{2} \frac{1}{U_{eq} A_{tot}} \quad (4.6)$$



**Figure 4.4:** Dataset di input (autunno/inverno)



**Figure 4.5:** Dataset di input (primavera/estate)

Dove  $U_{eq}$ , la trasmittanza termica equivalente, è calcolata come:

$$U_{eq} = \frac{\sum U_i A_i}{A_{tot}} \quad (4.7)$$

La capacità termica totale è  $[\frac{kWh}{K}]$ :

$$C_w = \frac{\sum c_i A_i}{3600} \quad (4.8)$$

Dove  $c_i$ , la capacità termica del componente opaco, è calcolata come:

$$c_i = \sum \rho_j c_j s_j \quad (4.9)$$

Dove  $\rho_j$ ,  $c_j$  e  $s_j$  rappresentano in ordine la densità del materiale, la capacità termica specifica e lo spessore dello stato j-esimo.

La capacità termica dell'aria interna è calcolata come  $[\frac{kWh}{K}]$ :

$$C_i = \gamma V \frac{\rho_{air} c_{air}}{3600} \quad (4.10)$$

Nel quale  $\gamma$  è un coefficiente adimensionale che tiene conto del mobilio interno dell'ambiente,  $V$  è il volume della cella,  $c_{air}$  e  $\rho_{air}$  sono rispettivamente la capacità termica e la densità dell'aria.

La resistenza termica per le infiltrazioni è pari a  $[\frac{K}{kW}]$ :

$$R_v = \frac{1}{\dot{m} \rho_{air} c_{air}} \quad (4.11)$$

Dove  $\dot{m}$  è la portata di ventilazione per infiltrazione calcolata secondo la norma UNI EN 12381:2003 [47],  $c_{air}$  e  $\rho_{air}$  sono rispettivamente la capacità termica e la densità dell'aria.

Infine l'area effettiva trasparente è calcolata come  $[m^2]$ :

$$A_w = A_{SG} + A_{EC1} + A_{EC2} \quad (4.12)$$

I pedici indicano il vetro statico ed i due vetri elettrocromici presenti sulla facciata.

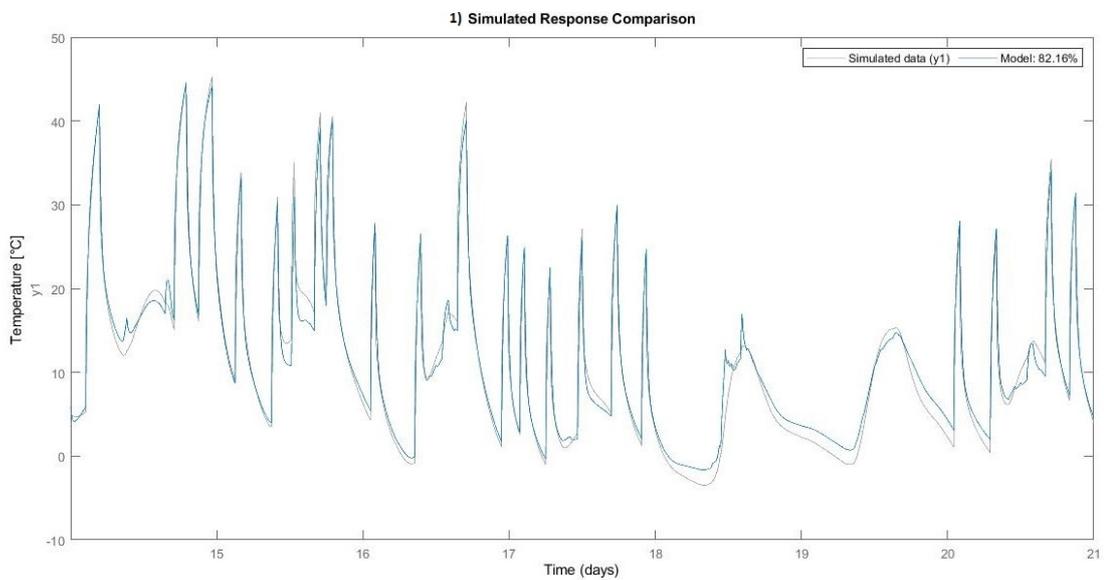
I parametri identificati tramite *Toolbox* di Matlab sono:

Parametro	Valore stimato	Limite superiore	Valore iniziale	Limite inferiore
$C_i [\frac{kWh}{K}]$	<b>0.0204</b>	0.0815	0.0407	0.0204
$C_e [\frac{kWh}{K}]$	<b>0.149</b>	0.7087	0.23623	0.0787
$R_i [\frac{kWh}{K}]$	<b>14.0795</b>	77.85	25.95	8.65
$R_v [\frac{kWh}{K}]$	<b>206.12</b>	206.1199	68.7066	22.9022
$A_w [\frac{kWh}{K}]$	<b>4.74</b>	4.74	3.16	2.1067

**Table 4.3:** Parametri identificati per il primo grey-box (autunno/inverno)

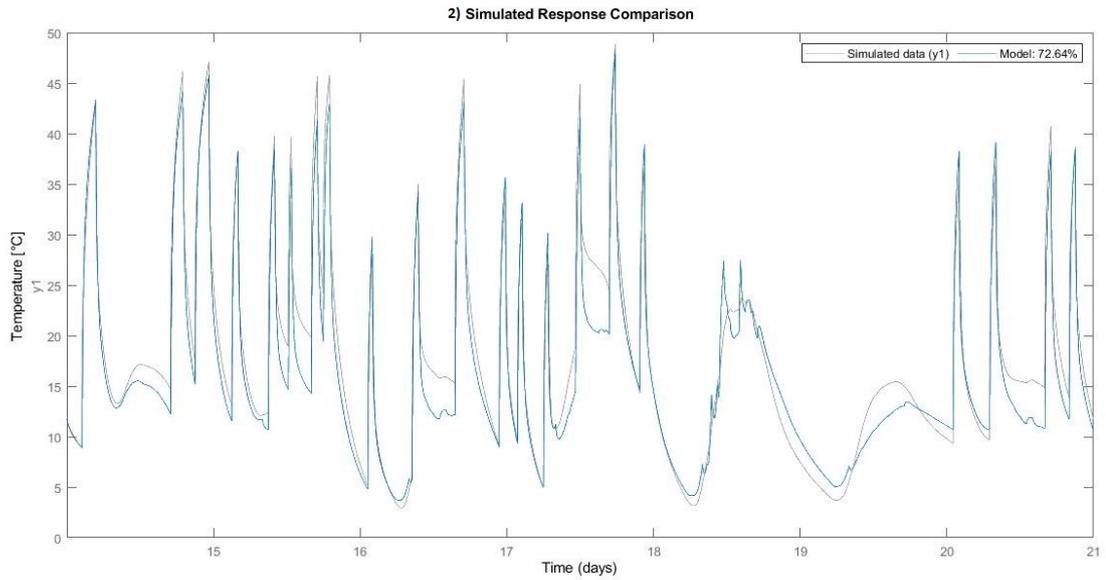
Parametro	Valore stimato	Limite superiore	Valore iniziale	Limite inferiore
$C_i$ [ $\frac{kWh}{K}$ ]	<b>0.0158</b>	0.1223	0.0407	0.0158
$C_e$ [ $\frac{kWh}{K}$ ]	<b>0.1312</b>	0.7087	0.23623	0.0787
$R_i$ [ $\frac{kWh}{K}$ ]	<b>14.4106</b>	77.85	25.95	8.65
$R_v$ [ $\frac{kWh}{K}$ ]	<b>206.12</b>	206.1199	68.7066	22.9022
$A_w$ [ $\frac{kWh}{K}$ ]	<b>3.32</b>	4.74	3.16	2.1067

**Table 4.4:** Parametri identificati per il secondo grey-box (primavera/estate)



**Figure 4.6:** Simulated Response Comparison (autunno/inverno)

Per il primo greybox in Figura 4.6 è stato ricavato un valore della radice dell'errore quadratico medio (NMRSE) pari a 81.93%, perciò si può considerare il modello descritto validato. Per il secondo grey-box, in Figura 4.7, si è ottenuto un valore di NMRSE di 75.16%.



**Figure 4.7:** Simulated Response Comparison (primavera/estate)

I due sistemi sono stati ritenuti in grado di predire abbastanza accuratamente il valore della temperatura dell'aria interna rispondendo coerentemente alle variazioni di condizioni al contorno. Le imperfezioni presenti possono essere causate dal fatto che le *Schedule* sono molto variabili e nella realtà non si andrà quasi mai a cambiare lo stato dell'impianto e dei vetri ogni 15 minuti, ma si avranno delle curve più lineari e coerenti con le condizioni meteorologiche o di comfort, in base al controllo implementato.

## Chapter 5

# Strategie di controllo avanzate

In questo capitolo sono presentate ed analizzate le strategie di controllo implementate per i vetri elettrocromici. Gli scopi della creazione di metodi di controllo sono la riduzione dell'energia consumata dall'impianto ed il mantenimento di condizioni di comfort visivo e termico. Sono stati sviluppati sei controlli Rule Based: due che si basano sulla radiazione solare incidente, variando i valori limite che permettono di cambiare lo stato del vetro; uno basato sulla temperatura dell'aria interna; uno che controlla l'illuminamento verticale in modo da prevenire il fenomeno di abbagliamento (*glare*); uno che si basa sull'illuminamento orizzontale, garantendo sempre un valore di luce (*daylight*) sul piano di lavoro compresa tra un limite superiore ed uno inferiore; ed infine una strategia finale che unisce il controllo basato sulla temperatura, sul *daylight* e sul *glare*. Successivamente sulla base del controllo sulla temperatura e quello totale sono stati implementati due controlli di tipo Rule Based predittivi. Questi fanno uso dei modelli grey-box ricavati nel Paragrafo 4.2.2 per prevedere la temperatura futura che ci sarà in ambiente e quindi scegliere lo stato dei vetri sulla base della previsione.

Tutti i metodi di controllo che saranno presentati sono stati studiati con l'obiettivo di essere applicati in campo con prove sperimentali. Si è fatto uso di variabili che possono essere misurate da sensori già presenti in campo o ricavate in tempo reale tramite calcoli matematici o file esistenti.

A causa del malfunzionamento dei vetri tutte le strategie sono state implementate su EnergyPlus tramite EMS (*Energy Managment System*). I controlli avvengono ogni 15 minuti in simulazioni lunghe sette giorni per quattro stagioni differenti, i mesi presi in considerazione sono Gennaio, Marzo ed Ottobre, con impianto di riscaldamento attivo, e Giugno in una condizione di free-running, in quanto la cella è sprovvista di un impianto di raffrescamento. Infine, per avere un quadro

generale del consumo energetico e dei parametri di comfort visivo e termico, è stata effettuata una simulazione annuale.

*Tutti i codici implementati per le varie strategie di controllo sono presenti negli allegati*

## 5.1 Controllo di riferimento

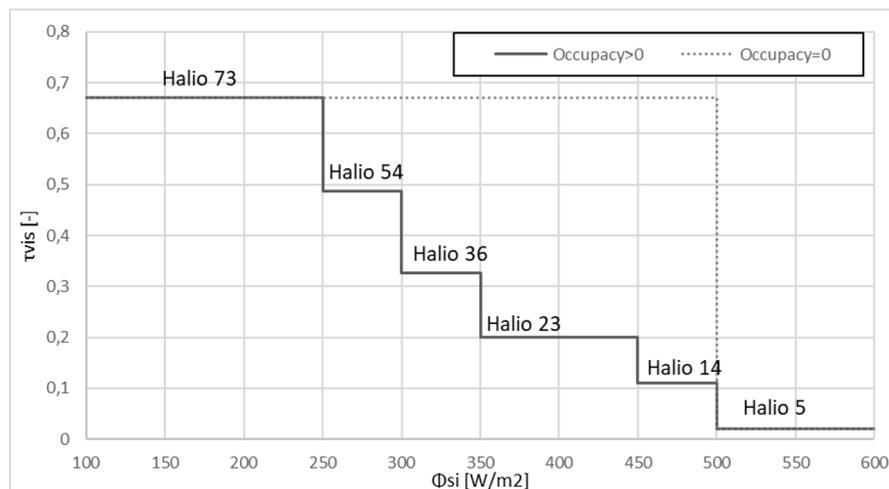
In modo da poter confrontare i parametri di performance energetica dei vari metodi di controllo è stato implementato un controllo di riferimento in cui l'impianto di riscaldamento è funzionante ed i vetri elettrocromici sono impostati sullo stato di massima trasparenza (Halio 73), come per il vetro statico.

Il nome del controllo è *ALL CLEAR*.

## 5.2 Controlli sulla radiazione

I controlli sulla radiazione sono di tipo Rule Based, e dipendono dalla quantità di radiazione solare incidente sulla facciata esposta a Sud, ovvero quella contenente le finestre elettrocromiche e statica.

La variabile controllata nelle simulazioni è ricavata come output di EnergyPlus, ma nel momento in cui il controllo sarà applicato in campo allora la radiazione solare incidente sarà ricavata dalle misure del piranometro esterno alla facciata esterna a Sud.



**Figure 5.1:** Valori soglia Controllo Rad 500

I due controlli differiscono nel limite massimo di radiazione, per la quale si hanno i vetri impostati nello stato più scuro, e di conseguenza sono diversi anche

i valori soglia interni. Nella prima strategia si ha un valore limite di  $500 \frac{W}{m^2}$ , da cui il nome *Rad 500*, invece nella seconda è pari a  $300 \frac{W}{m^2}$ , il cui nome è *Rad 300*. Sono stati effettuati i due controlli simili, ma essenzialmente diversi, in modo da poter analizzare le differenze in termini di consumo energetico per illuminazione e riscaldamento. Permettendo l'ingresso di più o meno radiazione solare nell'ambiente interno si varia anche la quantità di apporti gratuiti nei casi invernali.

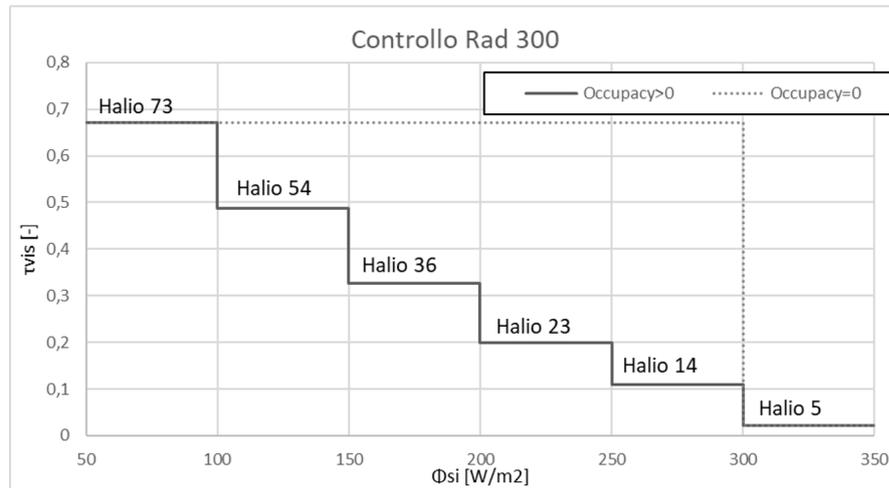


Figure 5.2: Valori soglia Controllo Rad 300

### 5.3 Controlli sulla temperatura

Questo controllo è basato sulla temperatura dell'aria interna della cella, che nelle simulazioni è ricavata come output di EnergyPlus, ma in sede sperimentale può essere misurata tramite le termocoppie già presenti in cella. Il nome della strategia è *Temperature*.

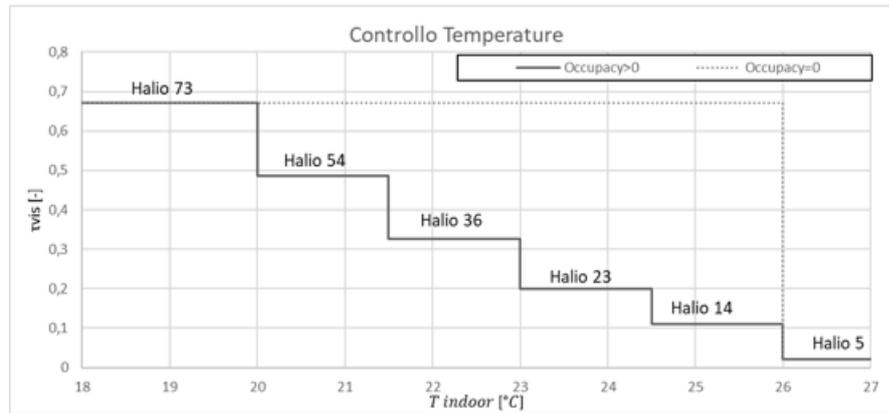


Figure 5.3: Valori soglia Controllo Temperature

### 5.4 Controlli sul Daylight

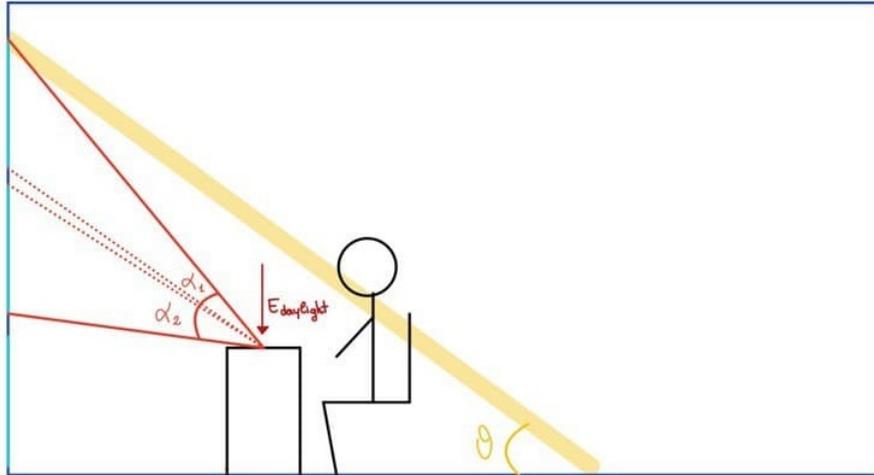
La strategia di controllo sul *Daylight* è stata creata con l'ottica di riuscire a controllare l'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro, i cui valori limiti, per mantenere una condizione di comfort visivo, sono pari a 300 lux e 3000 lux [48, 38, 39]. Per questo controllo si è considerato un punto di riferimento ad un metro di distanza dalla facciata vetrata ed 0.8 m di altezza dal suolo, pari all'altezza di una scrivania. Tutti i parametri, che saranno presentati, sono stati calcolati manualmente, in modo da poter utilizzare valori che potranno essere misurati sperimentalmente quando le strategie verranno implementate nel caso reale. Le variabili calcolate sono state inserite manualmente in EMS, in modo da poter essere inserite negli script creati per il controllo dei vetri.

Inizialmente sono state trovate le correlazioni tra i fattori geometrici della cella, come, ad esempio, gli angoli che formano le finestre rispetto al punto di riferimento. Tali angoli sono utili per determinare se nella cella, in un preciso momento, è presente la radiazione solare incidente, e se così non fosse, utilizzare nei calcoli solo la radiazione solare diffusa. Si precisa che nei calcoli effettuati si è trascurata la componente riflessa della radiazione solare, che avrebbe portato ulteriori complessità. Inoltre, conoscendo gli angoli per ciascun componente vetrato,

sono state implementate strategie che controllano separatamente le finestre in base al punto di incidenza della radiazione solare.

*Di questi controlli non sono stati riportati risultati, in quanto si è scelto di non considerarli per questo lavoro.*

In Figura 5.4 è rappresentato uno schema della cella con gli angoli calcolati necessari al controllo.



**Figure 5.4:** Schema cella per controllo Daylight

Gli angoli formati dalle finestre rispetto al punto di riferimento, oltre ad essere utilizzati per il controllo della radiazione solare incidente in un punto, sono utili anche al calcolo del fattore moltiplicativo della radiazione solare diffusa, pari al rapporto fra l'angolo della volta celeste visibile ed il totale. L'albero decisionale utilizzato per il controllo sull'illuminamento orizzontale è rappresentato in Figura 5.5.

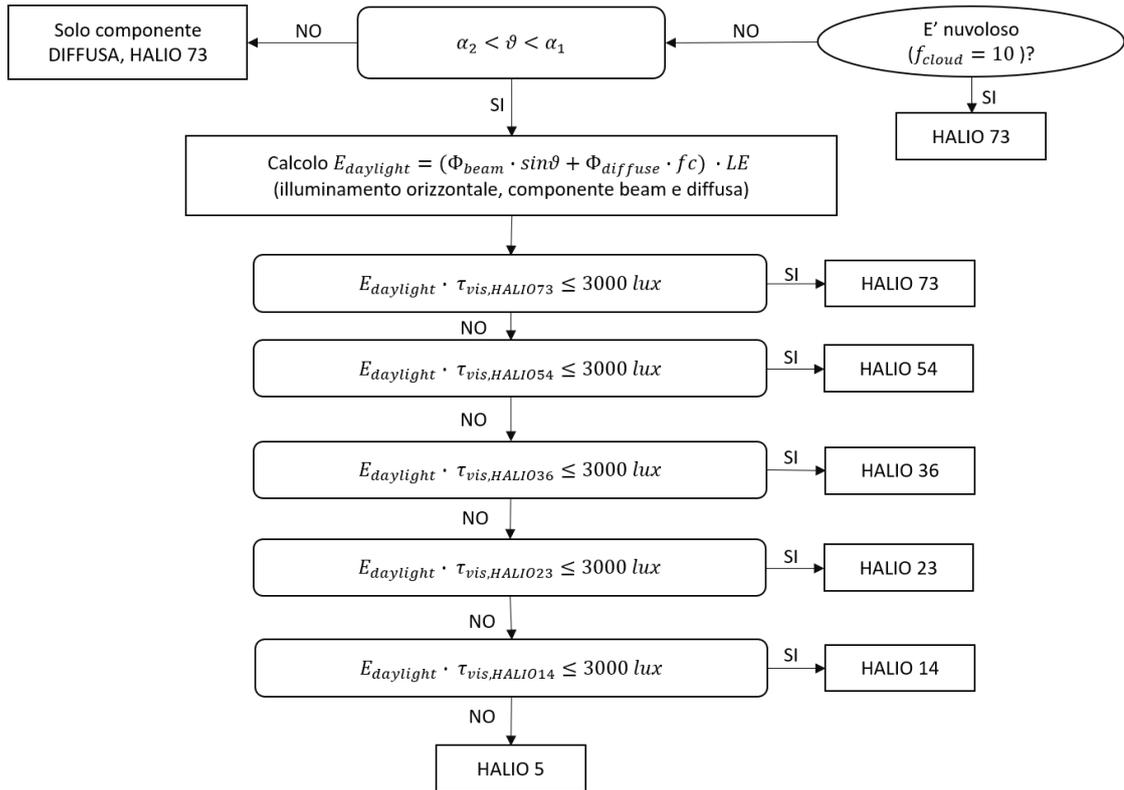


Figure 5.5: Albero decisionale per il Controllo sul Daylight

Dopo aver controllato che il cielo sia privo di nuvole è che la radiazione solare sia incidente nel punto di riferimento, si controlla che l'illuminamento orizzontale, moltiplicato per il coefficiente di trasmissione solare nel visibile degli stati dei vetri, sia inferiore ad un valore soglia che verifica la condizione di comfort visivo. Il controllo, se l'illuminamento non verifica la condizione con il primo stato, quello più chiaro, si ripete finché non si raggiunge lo stato più scuro.

I parametri utilizzati per il controllo sono :

- $f_{cloud}$ , il fattore che verifica la copertura del cielo;
- $\theta$ , l'angolo di incidenza della radiazione solare rispetto all'orizzontale;

- LE, la *Luminous Efficacy* pari a  $121.5 \text{ lm/W}$  o Efficienza Luminosa è il rapporto tra il flusso luminoso e il flusso radiante;
- $\tau_{vis}$ , il coefficiente di trasmissione solare nel visibile di tutti gli stati dei vetri;
- $f_c$ , fattore geometrico pari al rapporto tra l'angolo della volta celeste visibile ed il totale;
- $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , rispettivamente gli angoli del componente vetrato superiore e di mezzo, rispetto al punto di riferimento;
- $\Phi_{beam}$ , la componente *beam* della radiazione solare incidente;
- $\Phi_{diffuse}$ , la componente diffusa della radiazione solare.

L'illuminamento orizzontale è calcolato come la somma della componente verticale della radiazione beam, incidente su una superficie orizzontale, e la componente diffusa relativa alla volta celeste visibile, moltiplicate per la *Luminous Efficacy*.

Tutti i fattori elencati, in questo lavoro sono ottenuti come variabili di output da EnergyPlus oppure calcolati manualmente, ma quando il controllo sarà applicato sperimentalmente, le variabili relative alla radiazione solare beam, radiazione diffusa, all'angolo di incidenza solare e il fattore di copertura del cielo, sono facilmente reperibili grazie ai file climatici scaricabili da Solcast.

## 5.5 Controlli sul Glare

La strategia di controllo sul *Glare* è stata creata con l'ottica di riuscire a controllare l'illuminamento verticale che arriva all'osservatore nel punto di riferimento. Il controllo è strutturato come quello per il Daylight, ma si aggiunge uno step all'inizio dell'albero decisionale, nel quale si controlla che la componente di *Glare* non superi il valore di 4000 lux, che rappresenta il limite oltre il quale l'abbagliamento diventa intollerabile [48] con un DGP (*Daylight Glare Probability*), ovvero la percentuale di occupanti che sono disturbati da una condizione di abbagliamento, pari a 0.4.

L'illuminamento verticale è calcolato come la radiazione solare beam, moltiplicata per il  $\cos\theta$ , per la LE e per il coefficiente di trasmissione solare nel visibile nello stato più chiaro. Se il risultato di questo calcolo è pari ad un valore maggiore di 4000 lux, allora si imposta direttamente lo stato più scuro del vetro, senza effettuare verifiche sugli stati intermedi dei componenti elettrocromici.

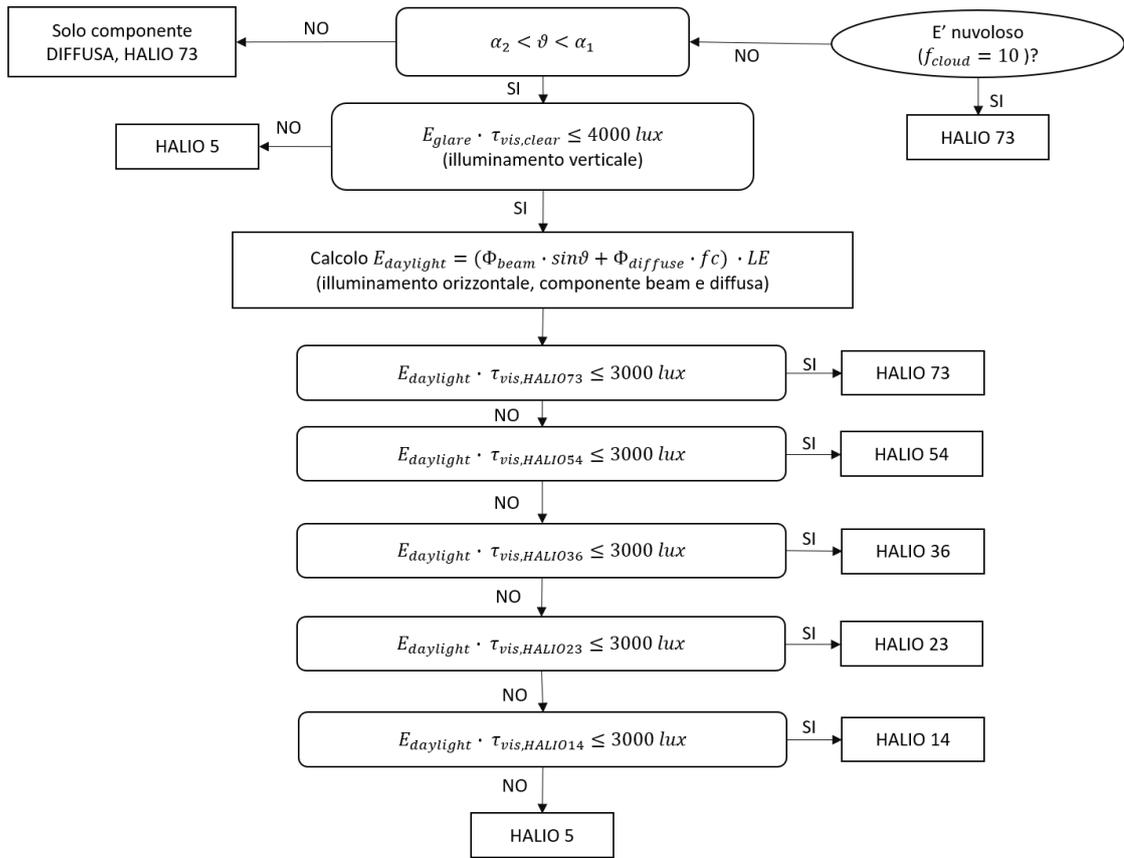


Figure 5.6: Albero decisionale per il Controllo sul Glare

## 5.6 Controllo totale

L'ultimo controllo Rule Based che è stato creato è un'unione dei controlli effettuati sulla temperatura, sul daylight e sul glare, descritti precedentemente. L'albero decisionale è strutturato come quelli precedenti, incomincia con il controllo della copertura del cielo, successivamente al controllo sulla presenza di radiazione solare incidente e quindi di abbagliamento, ed infine per ogni step è verificata la presenza congiunta di comfort visivo dato dall'illuminamento orizzontale e di comfort termico dato dalla temperatura interna dell'ambiente con un determinato stato Halio.

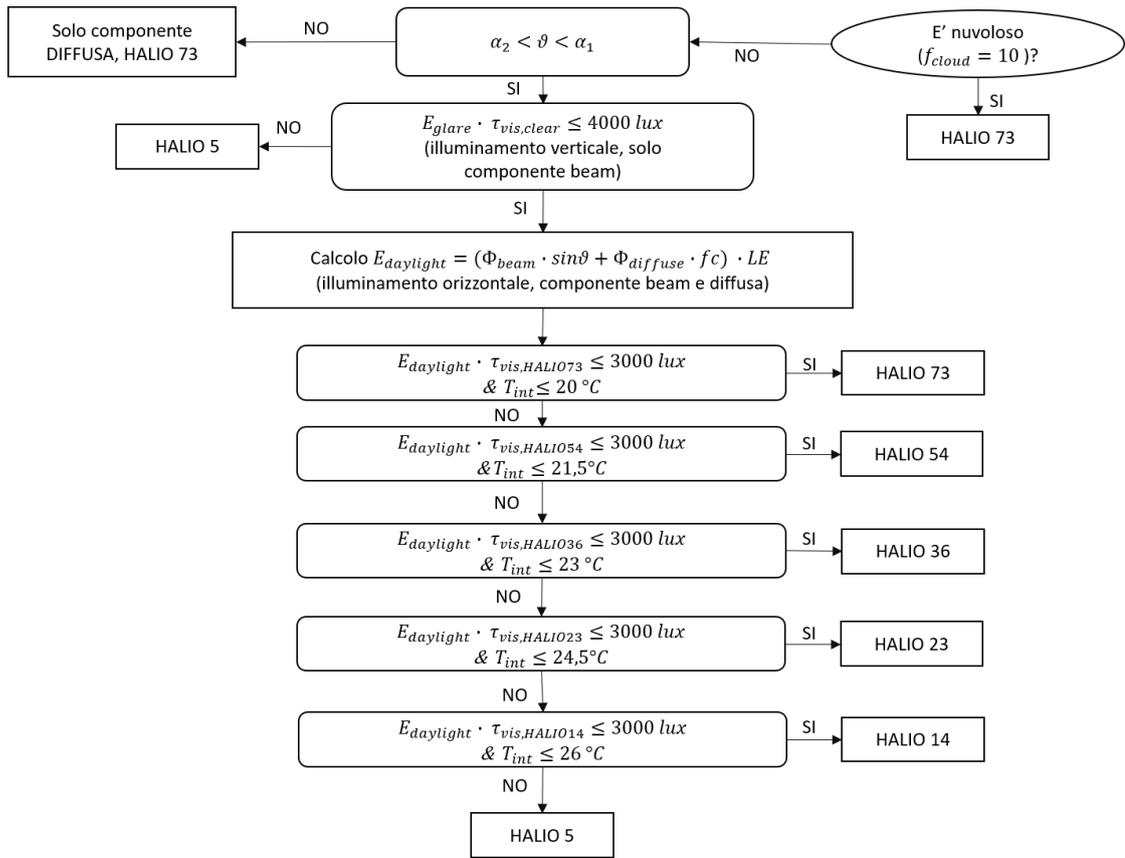


Figure 5.7: Albero decisionale per il Controllo Totale

## 5.7 Controlli Predictive Rule-Based Control

Il metodo di controllo di tipo PRBC è una valida alternativa ai *Model Predictive Control*, che sono computazionalmente più costosi e complessi a causa del modello di cui bisogna far uso. I PRBC sono meno complessi, fanno utilizzo di un modello in grado di prevedere delle variabili (in questo caso è stata considerata la variazione di temperatura interna e la temperatura interna futura) [49].

I controlli *Predictive Rule-Based Control* sono stati implementati tramite l'uso dei modelli ridotti creati, con lo scopo di riuscire a migliorare la strategia di controllo *Rule Based Totale* ed il controllo *Rule Based Temperature*, sfruttando la capacità del modello grey-box di predire la temperatura interna del timestep successivo e quindi scegliere lo stato del vetro da utilizzare. L'intervallo temporale considerato in questo controllo è di 10 minuti, ma la previsione è effettuata su un'ora perciò il controllo può anche essere chiamato *6-step ahead*.

Tale strategie di controllo non possono essere implementate come le altre

sull'EMS di EnergyPlus, ma essendo analiticamente più complesse, a causa dell'uso del modello RC, necessitano l'utilizzo di Matlab e quindi di un software di co-simulazione in grado di mettere in comunicazione EnergyPlus e Matlab. E' stato utilizzato il programma BCVTB 2.4.2, il quale ad ogni timestep riceve come output da EnergyPlus la temperatura interna della cella, la radiazione solare incidente, lo stato del vetro attuale e la potenza dell'impianto di riscaldamento; questi parametri sono utilizzati da Matlab come valori di input per stabilire le condizioni iniziali del modello RC che stimerà la temperatura dell'istante temporale successivo e sulla base di questa verrà scelto lo stato seguente del vetro che verrà inviato, da Matlab, come variabile di input ad EnergyPlus. Per effettuare la previsione della temperatura interna si ha bisogno di conoscere le previsioni della radiazione solare entrante attraverso il sistema vetrato e la temperatura esterna dell'aria, perciò è stato creato, tramite una simulazione di EnergyPlus, utilizzando un file climatico standard, e caricato su Matlab un file contenente i dati di temperatura esterna e radiazione solare al minuto. Per quanto riguarda la stima della potenza dell'impianto si è ipotizzato di conoscerne lo stato, assumendo costante il valore che si ricava come output da EnergyPlus nell'istante precedente.

I controlli implementati sono stati pensati per cercare di migliorare le strategie *Rule Based Temperature* e *Rule Based Totale*. Nel primo controllo per riuscire ad escludere i possibili errori presenti nel modello RC, il metodo con il quale si sceglie lo stato del vetro si basa inizialmente su una stima dell'andamento di temperatura, ovvero se questa sta aumentando o diminuendo.

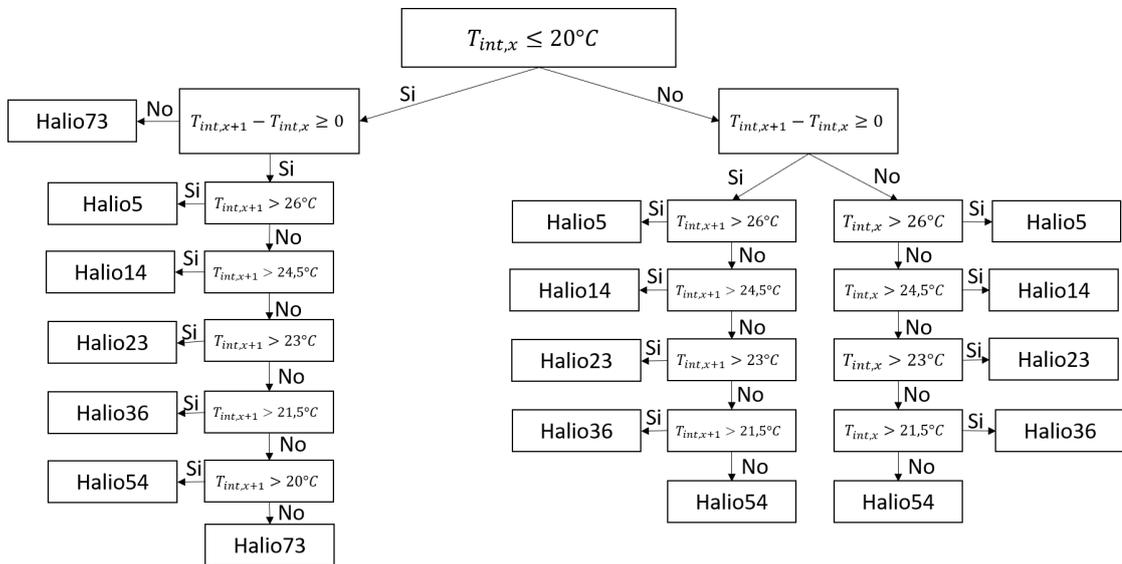


Figure 5.8: Albero decisionale per il *Predictive Rule-Based Control Temperature*

L'albero decisionale prevede, in base alla temperatura interna attuale, ed all'andamento della temperatura prevista, varie strade possibili che basano la scelta del vetro o sulla temperatura futura prevista o sulla temperatura interna presente, come mostrato in Figura 5.8. Nel secondo metodo di controllo si unisce l'abilità del modello RC di prevedere la temperatura e contemporaneamente a questa si controlla la presenza futura di *glare* e *daylight*, grazie all'utilizzo del file climatico standard caricato su Matlab, che permette il calcolo manuale dell'illuminamento orizzontale e verticale tramite le variabili di radiazione solare incidente beam ed altezza solare, come descritto nel Paragrafo 5.5. In Figura 5.9 è riportato l'albero decisionale utilizzato per implementare il controllo.

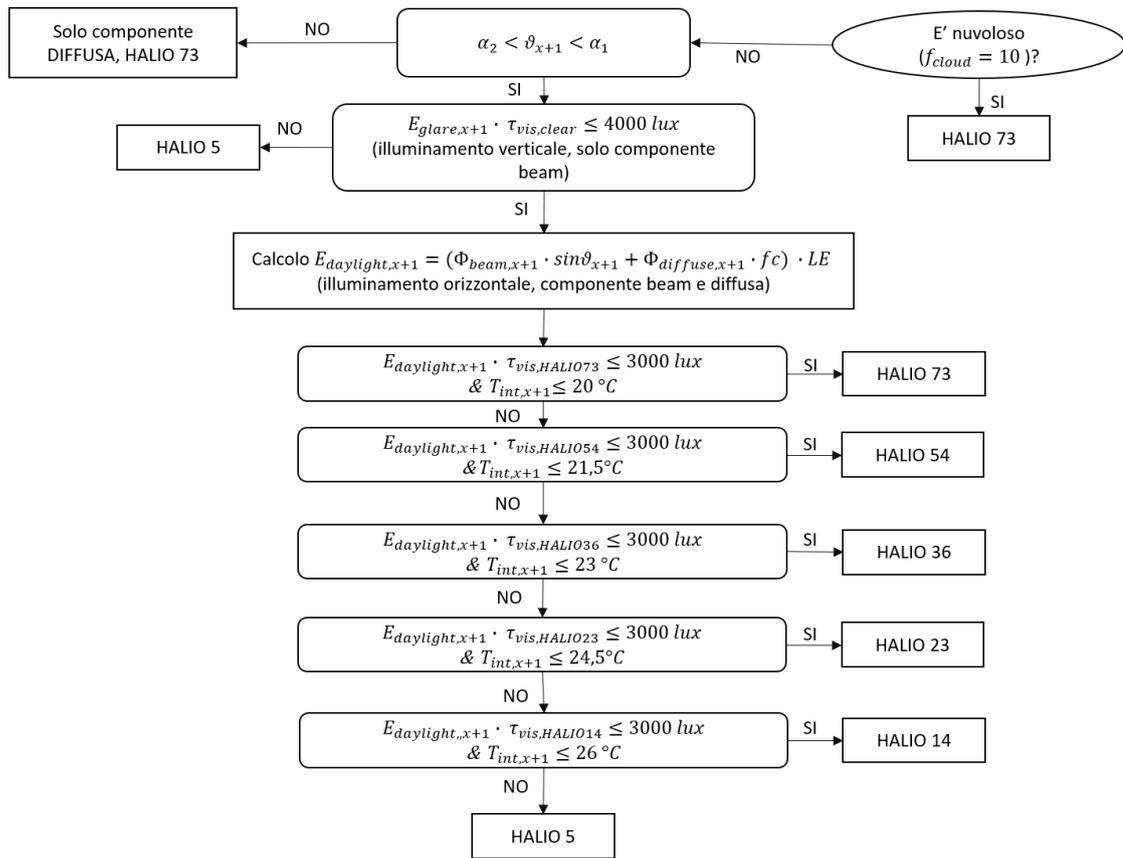


Figure 5.9: Albero decisionale per il *Predictive Rule-Based Control Totale*

## 5.8 Risultati e confronti

In questa sezione sono riportate Figure e Tabelle che rappresentano i confronti di diversi parametri energetici ottenuti tramite l'adozione delle strategie di controllo implementate e descritte nei paragrafi precedenti. Sono state studiate quattro settimane, una per ogni stagione dell'anno, nei mesi di Gennaio, Marzo, Giugno ed Ottobre, ed infine per valutare l'energia totale richiesta dall'impianto sono stati effettuati i vari controlli su un anno di simulazione.

Per ogni settimana, simulata con ciascun metodo di controllo, sono state rappresentate variabili in funzione del tempo, quali la radiazione solare incidente  $\Phi_{si}$ , l'illuminamento orizzontale calcolato nel punto di riferimento  $E_{daylight}$ , la potenza necessaria all'illuminamento  $\Phi_{lighting}$ , la potenza dell'impianto di riscaldamento  $\Phi_{heating}$ , lo stato dei vetri elettrocromici  $gvalue$  la temperatura interna dell'ambiente  $T_{indoor}$  e la temperatura dell'aria esterna  $T_{outdoor}$ .

Ulteriori parametri rappresentati sono l'energia totale richiesta per l'illuminamento e il riscaldamento, per descrivere il discomfort visivo è indicato l'UDI (*Useful Daylight Illuminance*) quando ha valori maggiori di 3000 lux (*UDI-exceeded*) e minori di 300 lux (*UDI-fell short*), fuori dal range considerato per il comfort [50] e definito dal parametro *UDI-autonomous* tra i 300 e 3000 lux.

Sono stati calcolati i parametri *UDI-exceeded* e *UDI-fell short* per indicare il discomfort visivo e confrontarlo per le settimane studiate. Inizialmente è stato ricavato l'illuminamento orizzontale per ogni minuto di ogni giorno, poi è stato calcolato la sommatoria di quante volte durante le 10 ore lavorative, ovvero quelle considerate con occupazione, dalle 8 del mattino alle 18 del pomeriggio, si è superata la soglia di 3000 lux o non è stata raggiunta quella di 300 lux, che sono i limiti scelti per delimitare il comfort visivo [48]; ed infine la sommatoria è stata divisa per il tempo di occupazione [51].

$$UDI - fellshort = \frac{\sum n_{UDI < 300}^{\circ}}{h_{occ}} [\%] \quad (5.1)$$

$$UDI - exceeded = \frac{\sum n_{UDI > 3000}^{\circ}}{h_{occ}} [\%] \quad (5.2)$$

Per descrivere il discomfort termico in ambiente sono indicati due parametri: il PDH (*Percentage of Discomfort Hours*) ed il DH (*Degree Hours*). Entrambi i parametri sono due dei tre metodi di valutazione a lungo termine delle condizioni generali di comfort termico in un ambiente in un certo periodo dell'anno, descritti nell'appendice F della normativa EN 16798-1:2019 [52]. Il primo metodo indica la percentuale di ore in cui l'edificio o l'ambiente è occupato durante le quali la temperatura operativa è fuori da un determinato range, calcolato in questo lavoro

attraverso il software *CBE Thermal Comfort Tool* [53], 18.5°C e 28°C.

$$PDH_{oc} = \sum h_{occ} \cdot T_{op} > T_{op,max}[\%] \quad (5.3)$$

$$PDH_{oh} = \sum h_{occ} \cdot T_{op} < T_{op,min}[\%] \quad (5.4)$$

Il secondo metodo permette di calcolare le ore occupate in cui la temperatura operativa è al di fuori di un certo range, valutate con un fattore di peso  $wf$ .

$$wf = |T_{op} - T_{op,limite}| \quad (5.5)$$

Per valutare il livello di discomfort il fattore di peso è moltiplicato per il tempo e sommato su tutto il periodo considerato.

$$DH_{oc} = \sum (wf_{oc} \cdot time) \quad (5.6)$$

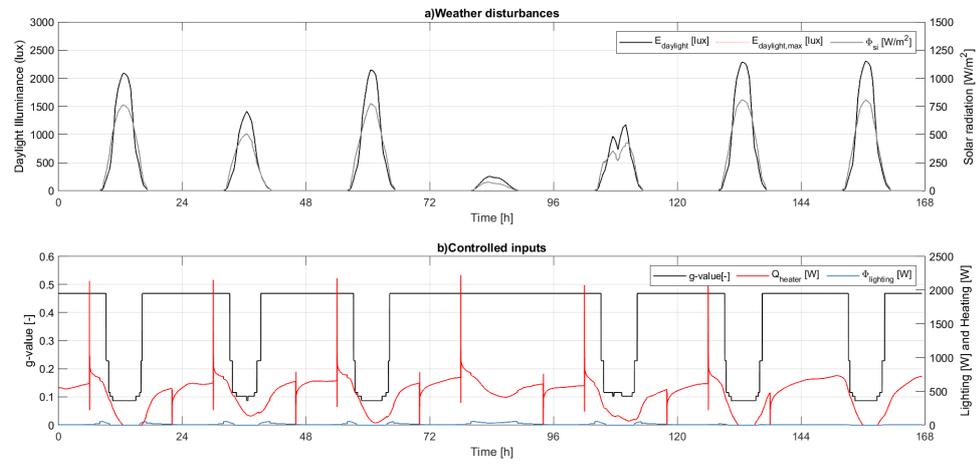
$$DH_{oh} = \sum (wf_{oh} \cdot time) \quad (5.7)$$

Dove *oc* indica *overcooling* e *oh* indica *overheating*.

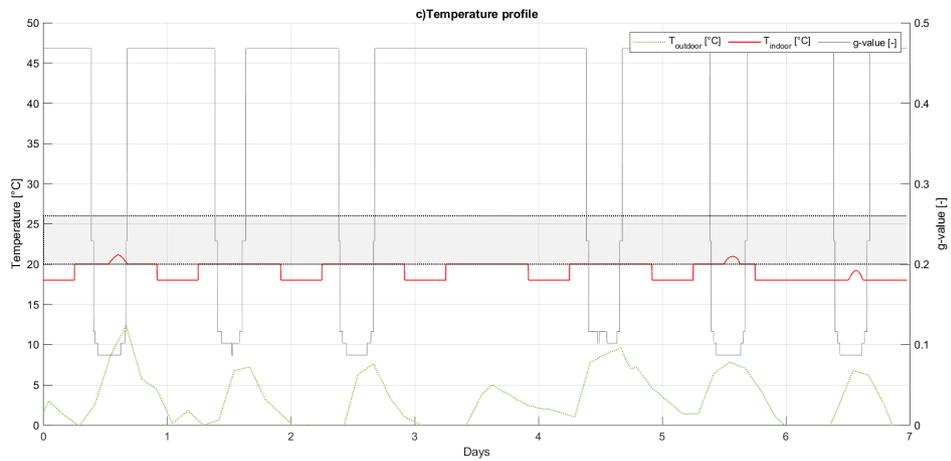
Per comodità non verranno inserite nel capitolo tutte le figure create, ma sono state scelte le più significative per i confronti ed i commenti.

### 5.8.1 Gennaio

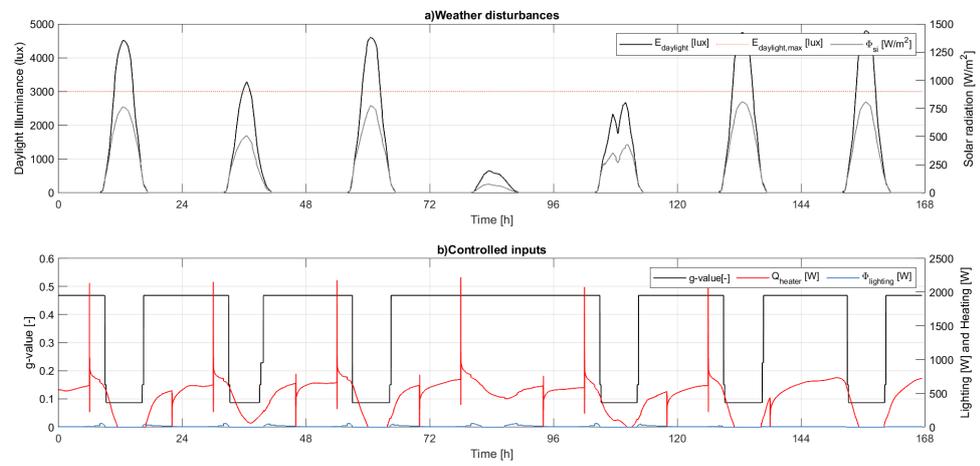
Sono rappresentati i risultati di alcune strategie Rule Based, *Rad 500*, *Glare e Temperature* e strategie Predictive Rule-Based Control sul *Temperature e Totale*, per la settimana che va dal 20 al 26 Gennaio a Torino.



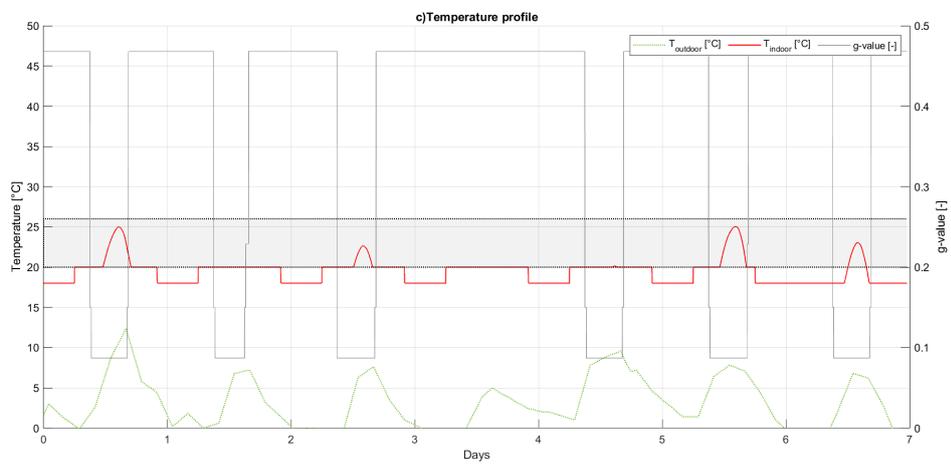
**Figure 5.10:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500*  
Control Gennaio



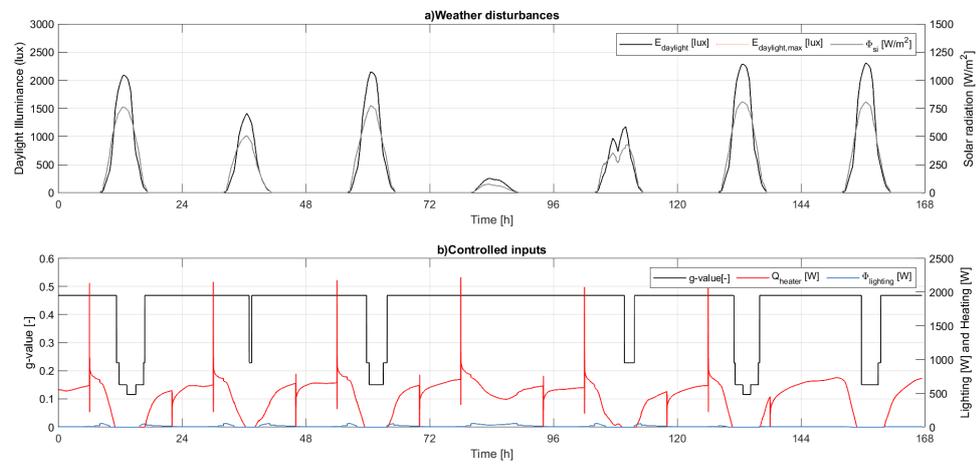
**Figure 5.11:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500*  
Control Profilo temperature Gennaio



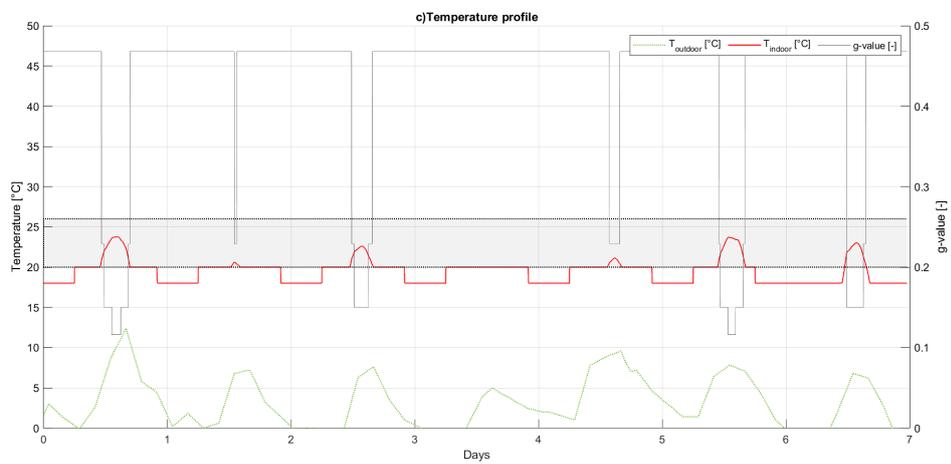
**Figure 5.12:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Gennaio



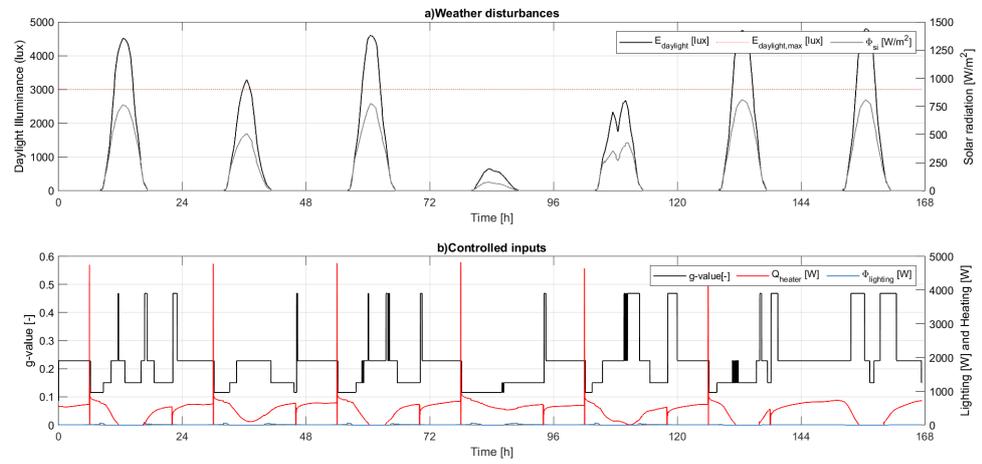
**Figure 5.13:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Profilo temperature Gennaio



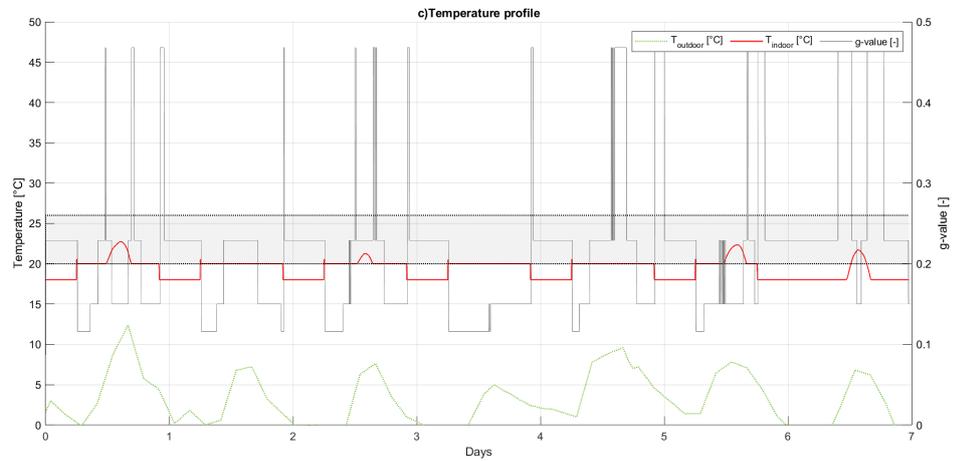
**Figure 5.14:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Gennaio



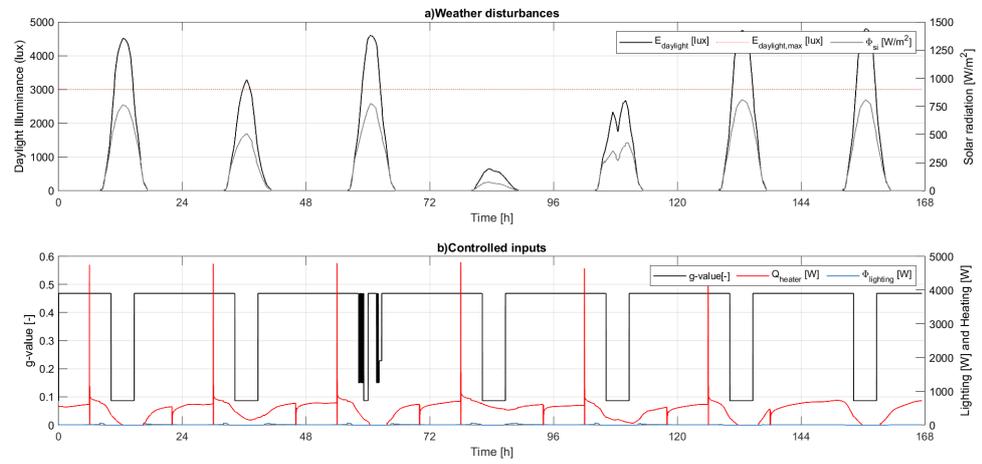
**Figure 5.15:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Profilo temperature Gennaio



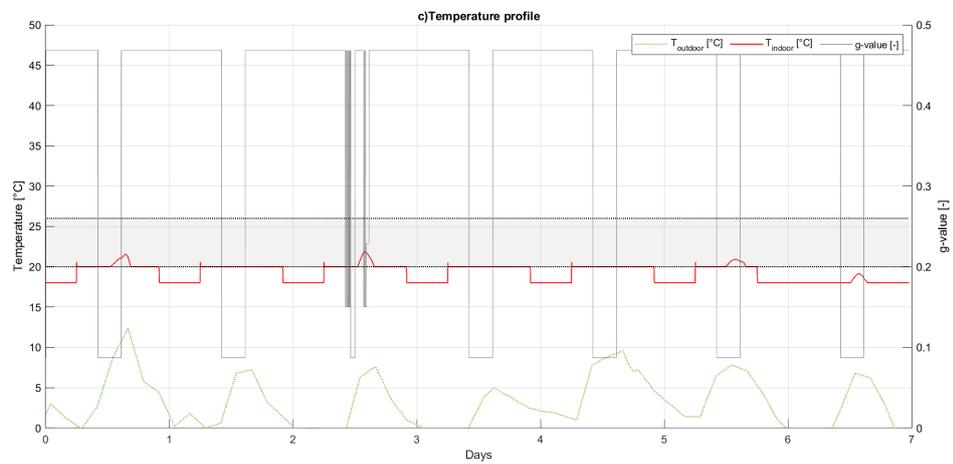
**Figure 5.16:** Predictive Rule-Based Control-enhanced Temperature Gennaio



**Figure 5.17:** Predictive Rule-Based Control-enhanced Temperature Profile temperatura Gennaio



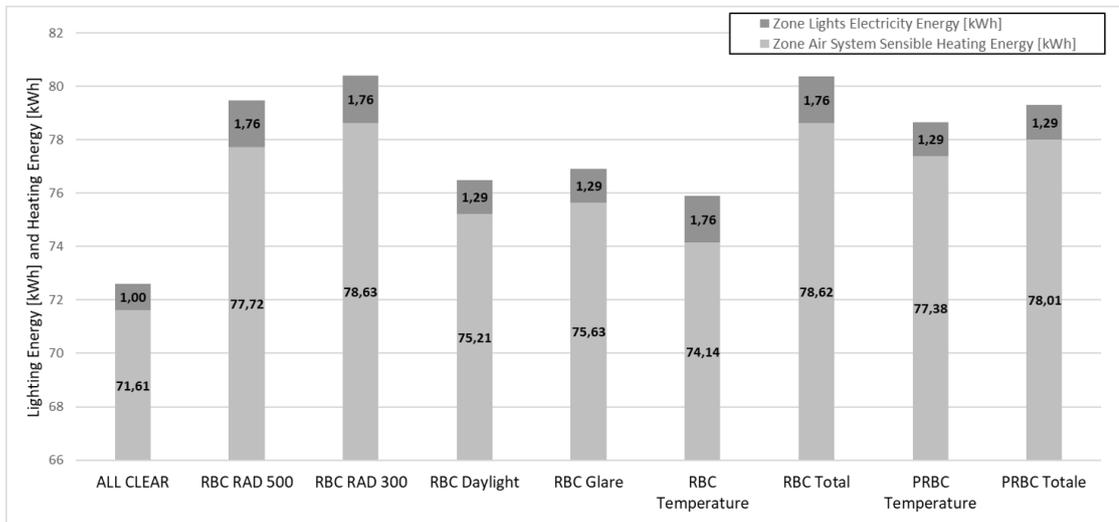
**Figure 5.18:** Predictive Rule-Based Control-enhanced Totale Gennaio



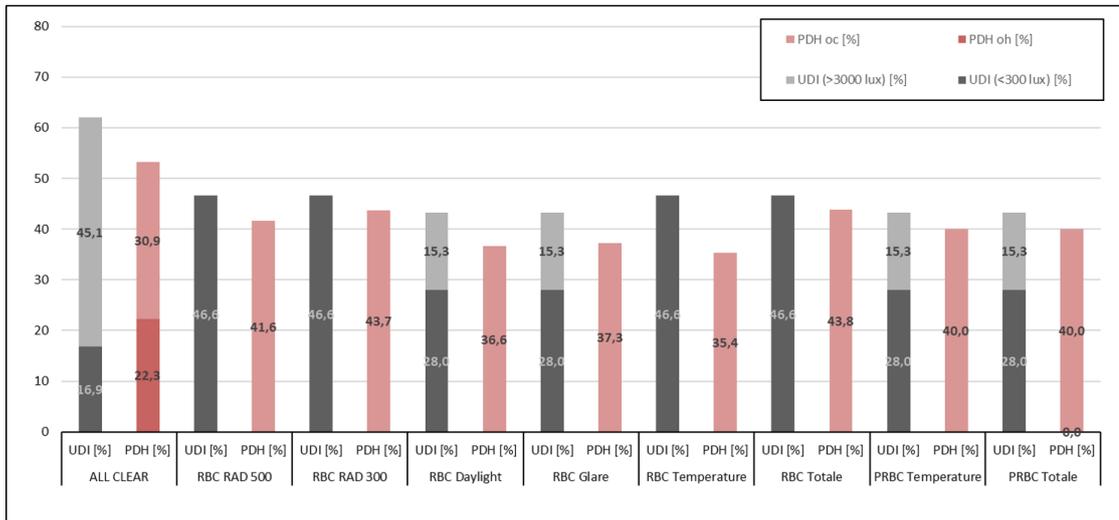
**Figure 5.19:** Predictive Rule-Based Control-enhanced Totale Profilo temperatura Gennaio

Control	Total Energy [kWh]	$UDI_{fs}$ [%]	$UDI_{exc}$ [%]	PDH [%]	$DH_{oc}$	$DH_{oh}$
ALL CLEAR	72.6	16.9	45.1	53.2	18.5	60.7
RBC RAD 500	79.5	46.6	0	41.6	24.5	0
RBC RAD 300	80.4	46.6	0	43.7	26.1	0
RBC Daylight	76.5	27.9	15.3	36.6	21.4	0
RBC Glare	76.9	27.9	15.3	37.3	21.7	0
RBC Temperature	75.9	46.6	0	35.4	21.3	0
RBC Total	80.4	46.6	0	43.8	25.9	0
PRBC Temperature	78.7	27.9	15.3	40.0	24.6	0
PRBC Totale	79.3	27.9	15.3	40.9	25.2	0

**Table 5.1:** Confronto performance dei controlli per Gennaio



**Figure 5.20:** Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Gennaio



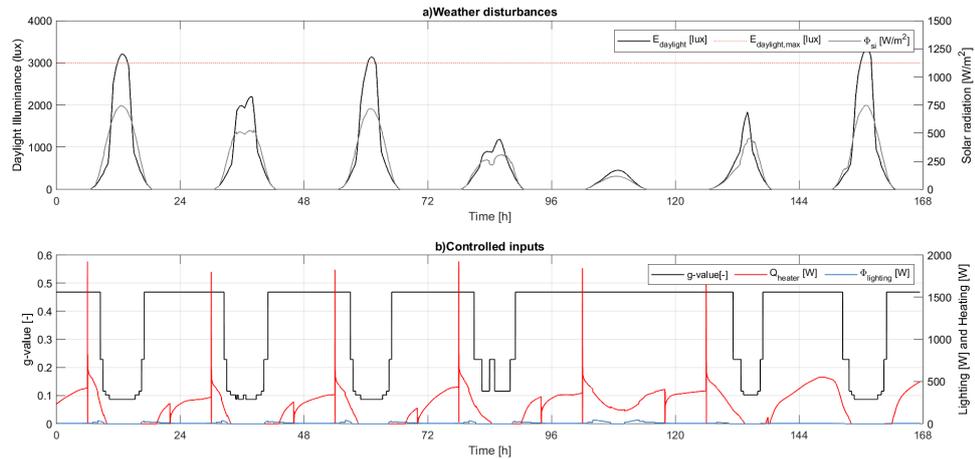
**Figure 5.21:** Confronto parametri per il comfort termico e visivo Gennaio

In Tabella 5.1  $UDI_{exc}$  ed  $UDI_{fs}$  indicano rispettivamente *UDI-exceeded* (>3000 lux) ed *UDI-fell short* (<300 lux)

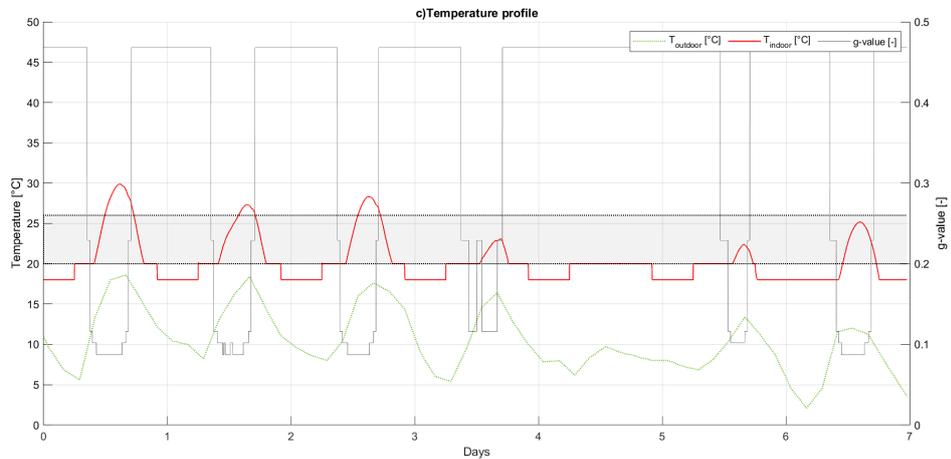
Nella settimana invernale gli apporti solari sono considerati una risorsa in quanto consentono di riscaldare l'ambiente diminuendo l'utilizzo dell'impianto di riscaldamento. Dalla Tabella 5.1 si nota come i due controlli predittivi riescono a diminuire il discomfort visivo del circa il 4% rispetto ai corrispettivi controlli Rule Based, andando ad assumere valori uguali a quelli ottenuti dai controlli RBC sul *Daylight* e *Glare*. Nel caso del controllo PRBC *Temperature* il fattore di discomfort termico PDH aumenta, a causa del fenomeno dell'overcooling che si verifica, in quanto avendo come obiettivo il controllare la temperatura in cella tramite previsioni future, lo stato dei vetri si scurisce prima rispetto al controllo Rule Based, provocando una diminuzione della temperatura ambiente nell'istante di tempo reale. Questo fenomeno è amplificato essendo in una settimana invernale, infatti si rispecchia anche nei consumi energetici che aumentano di 1 kWh per il controllo predittivo sulla temperatura rispetto a quello Rule Based. Con il controllo predittivo totale, che tiene conto sia dell'illuminamento orizzontale e verticale che della temperatura, si riesce a ridurre di 1 kWh il consumo energetico e di circa il 3% il fattore di discomfort termico PDH, grazie alla previsione sia della temperatura esterna che dell'illuminamento.

### 5.8.2 Marzo

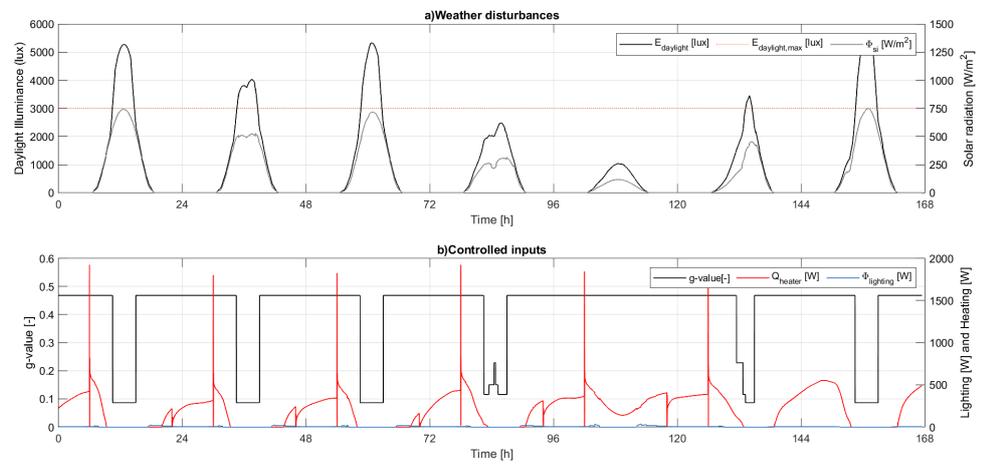
Sono rappresentati i risultati di alcune strategie Rule Based, *Rad 500*, *Glare* e *Temperature* e strategie Predictive Rule-Based Control sul *Temperature e Totale*, per la settimana che va dal 20 al 26 Marzo a Torino.



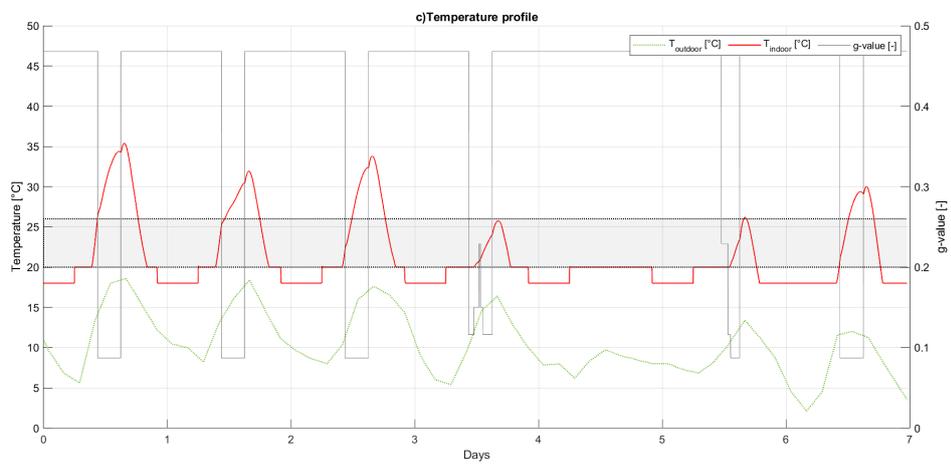
**Figure 5.22:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500 Control* Marzo



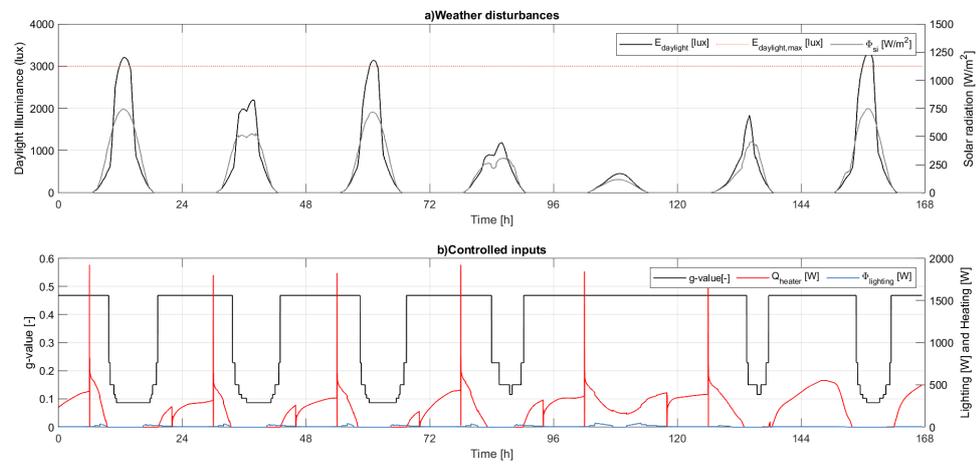
**Figure 5.23:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500 Control* Profilo temperature Marzo



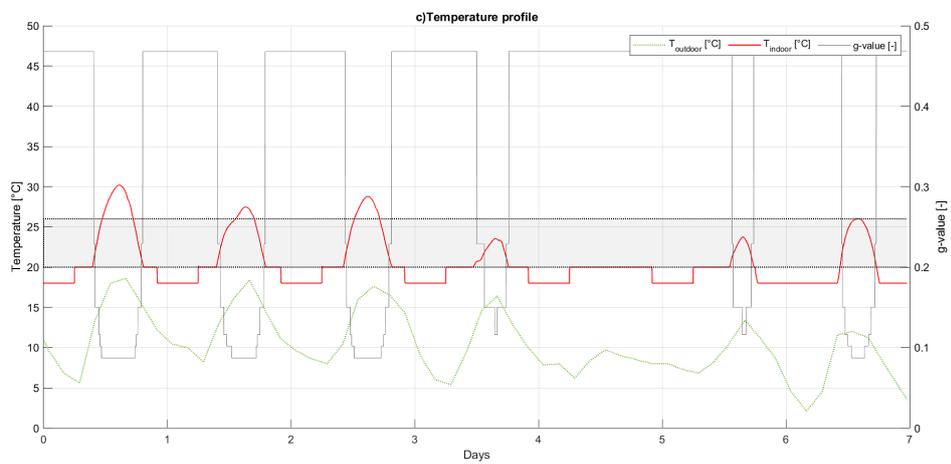
**Figure 5.24:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Marzo



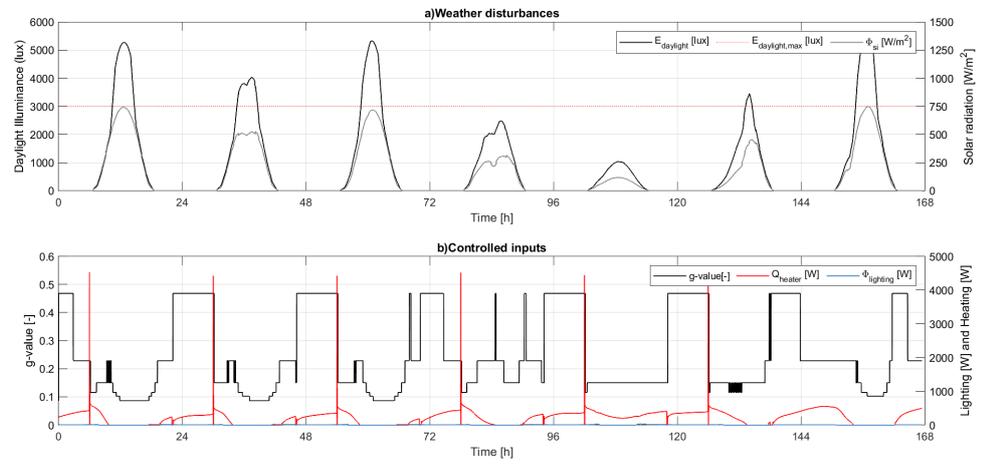
**Figure 5.25:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Profilo temperature Marzo



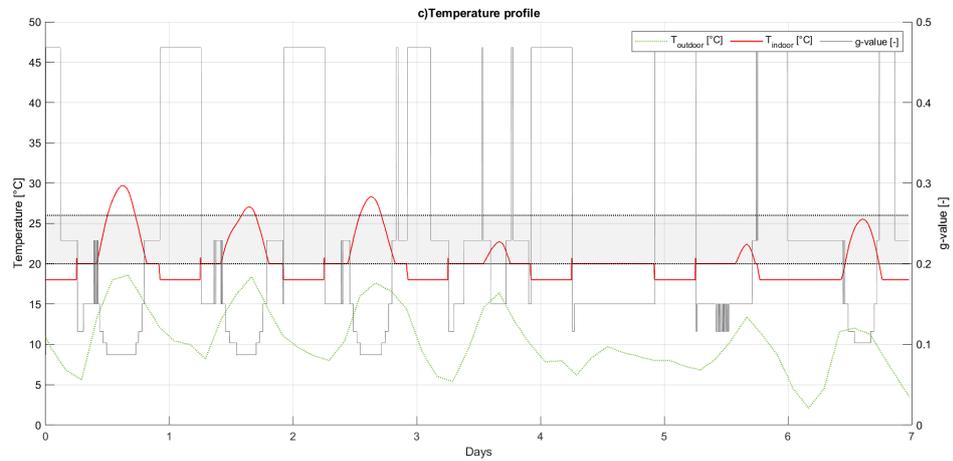
**Figure 5.26:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Marzo



**Figure 5.27:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Profilo temperature Marzo



**Figure 5.28:** Predictive Rule-Based Control Temperature Marzo



**Figure 5.29:** Predictive Rule-Based Control Temperature Profile temperature Marzo

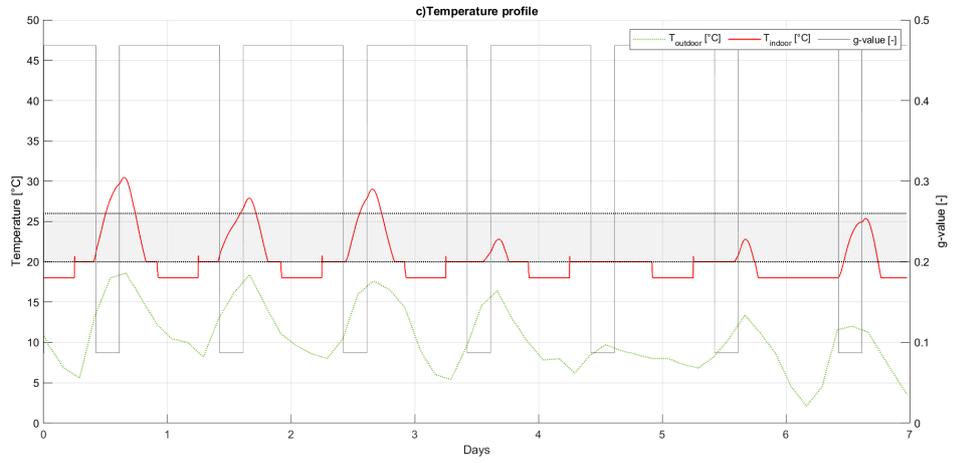


Figure 5.30: Predictive Rule-Based Control Totale Marzo

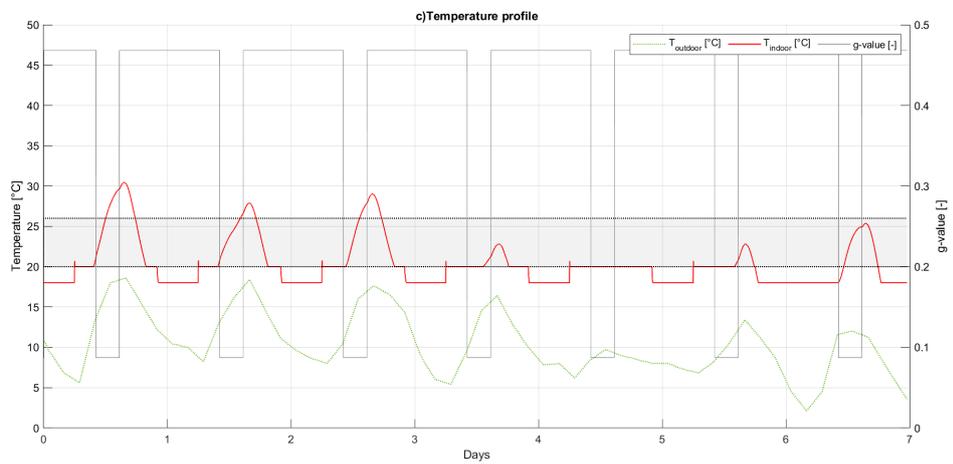
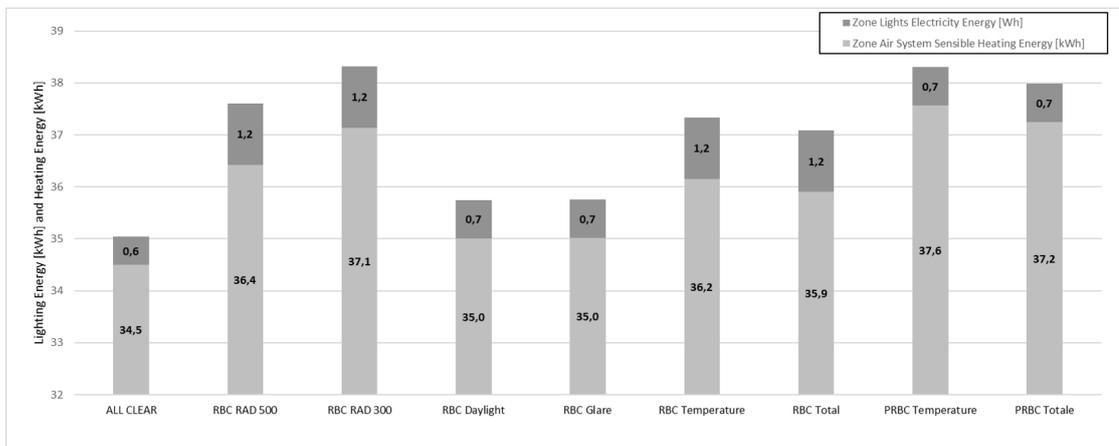


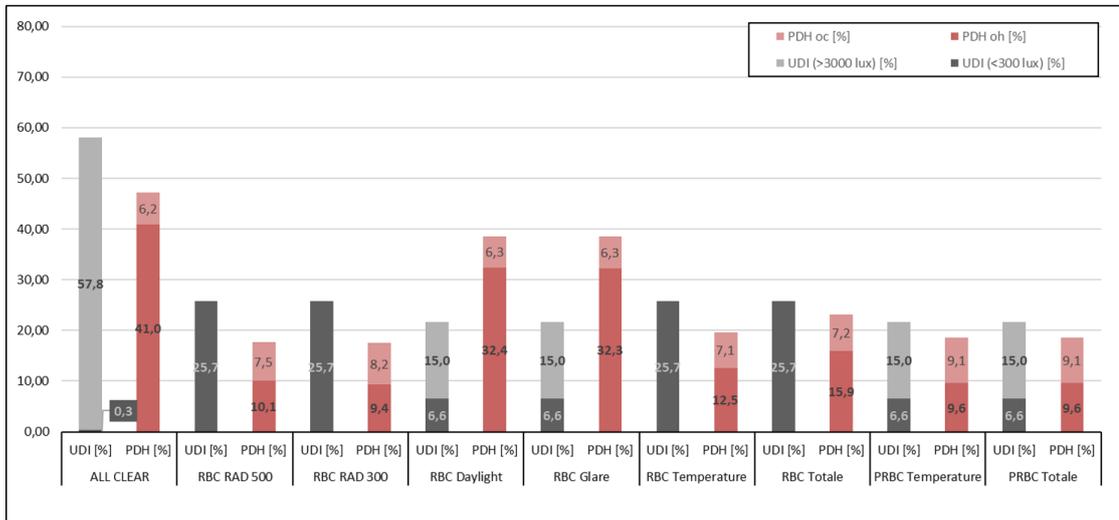
Figure 5.31: Predictive Rule-Based Control Totale Profilo temperature Marzo

Control	Total Energy [kWh]	$UDI_{fs}$ [%]	$UDI_{exc}$ [%]	PDH [%]	$DH_{oc}$	$DH_{oh}$
ALL CLEAR	35.0	0.31	57.8	47.2	2.1	216.2
RBC RAD 500	37.6	25.7	0	17.6	2.8	9.0
RBC RAD 300	38.3	25.7	0	17.5	3.2	8.1
RBC Daylight	35.7	6.6	15.1	38.6	2.1	82.4
RBC Glare	35.8	6.6	15.1	38.5	2.1	81.5
RBC Temperature	37.3	25.7	0	19.7	2.5	11.9
RBC Total	37.1	25.7	0	23.1	2.6	21.3
PRBC Temperature	38.3	6.6	15.1	18.6	3.3	8.0
PRBC Totale	38.0	6.6	15.1	20.7	3.0	12.1

**Table 5.2:** Confronto performance dei controlli per Marzo



**Figure 5.32:** Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Marzo



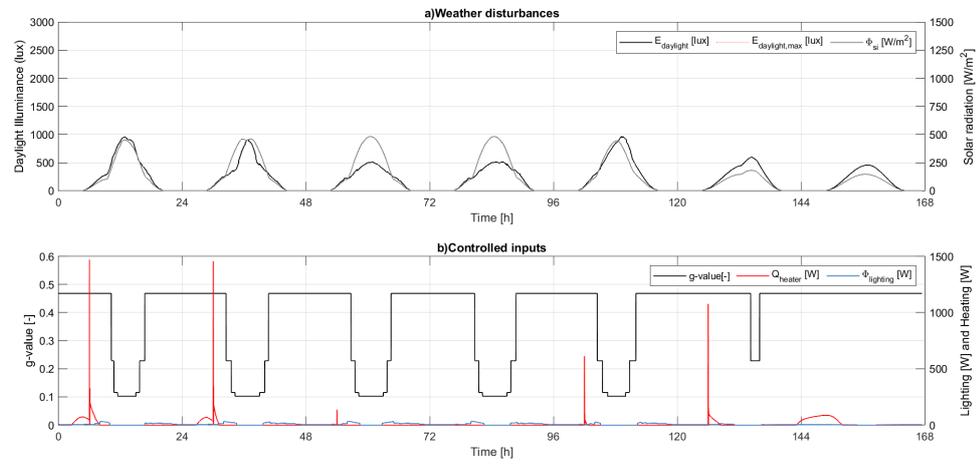
**Figure 5.33:** Confronto parametri per il comfort termico e visivo Marzo

In Tabella 5.2  $UDI_{exc}$  ed  $UDI_{fs}$  indicano rispettivamente *UDI-exceeded* (>3000 lux) ed *UDI-fell short* (<300 lux)

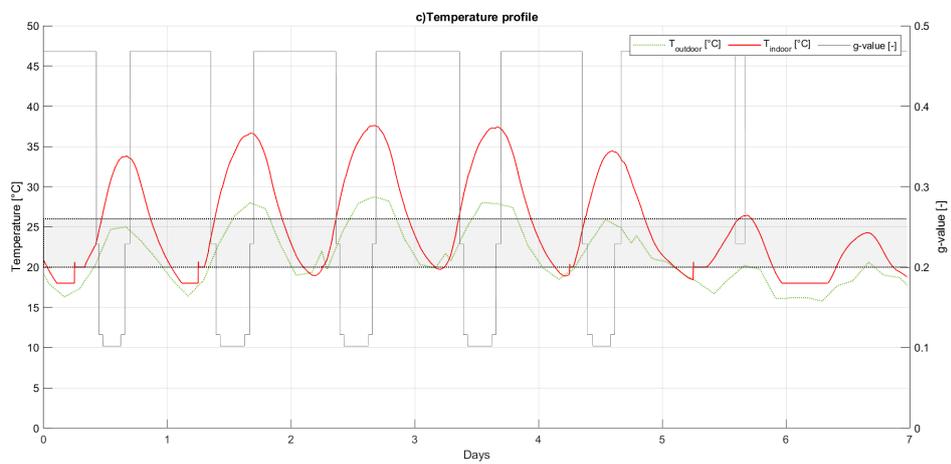
Nella settimana primaverile gli apporti solari sono considerati una risorsa in quanto consentono di riscaldare l'ambiente diminuendo l'utilizzo dell'impianto di riscaldamento, ma allo stesso tempo nelle giornate soleggiate costituiscono un problema in quanto surriscaldano l'ambiente interno. Dalla tabella 5.2 si nota come i controlli PRBC siano in grado di diminuire, con i corrispettivi controlli RB, i fattori di discomfort termico, i controlli sulla temperatura del 1% e totali del 3%, e visivo entrambi del 4% circa. In entrambi i casi diminuisce la quota di overheating, ma aumenta quella di overcooling, perchè come per Gennaio, se i vetri si scuriscono prima, diminuendo la radiazione solare entrante, la temperatura interna istantanea tende a diminuire. Di conseguenza, anche in questa settimana, l'energia totale richiesta dall'impianto con i controlli predittivi aumenta di 1 kWh.

### 5.8.3 Giugno

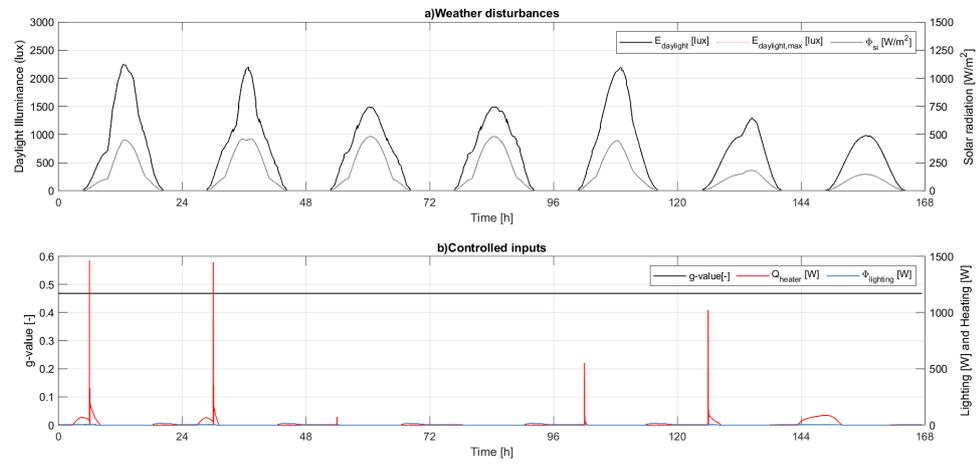
Sono rappresentati i risultati di alcune strategie Rule Based, *Rad 500*, *Glare* e *Temperature* e strategie Predictive Rule-Based Control sul *Temperature* e *Totale*, per la settimana che va dal 21 al 27 Giugno a Torino.



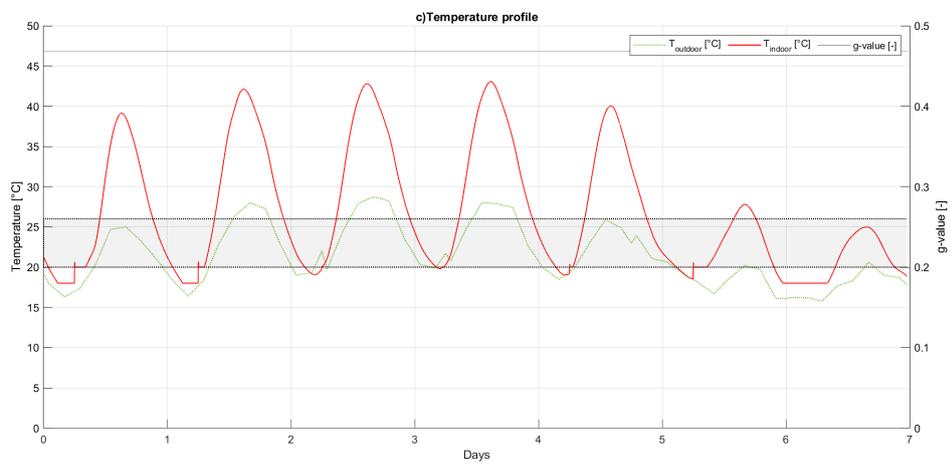
**Figure 5.34:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500*  
Control Giugno



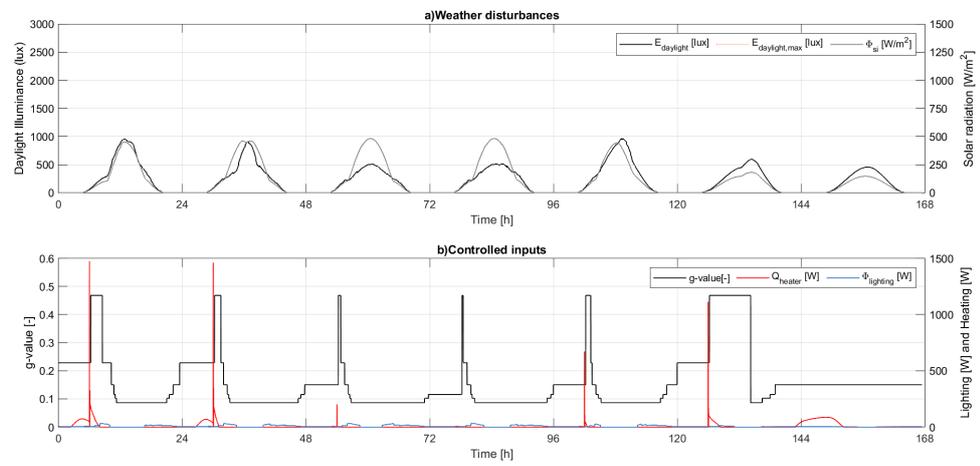
**Figure 5.35:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500*  
Control Profilo di temperatura Giugno



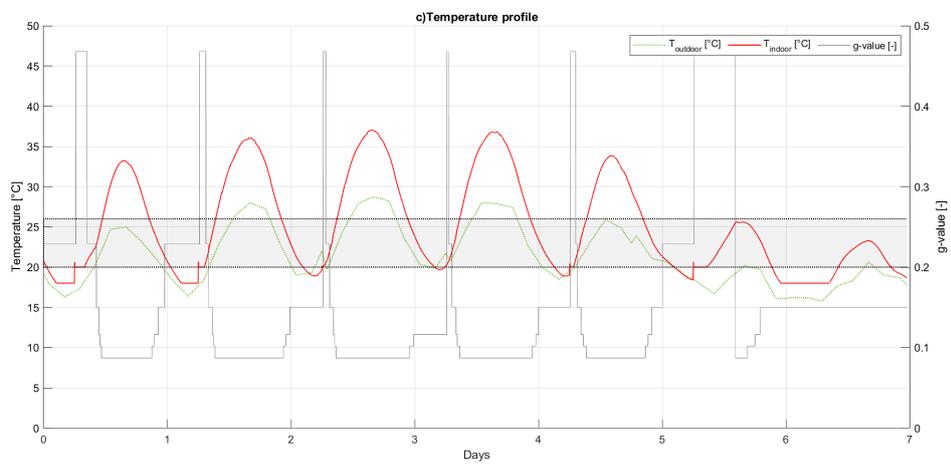
**Figure 5.36:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Giugno



**Figure 5.37:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Profilo di temperatura Giugno



**Figure 5.38:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Giugno



**Figure 5.39:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Profilo di temperatura Giugno

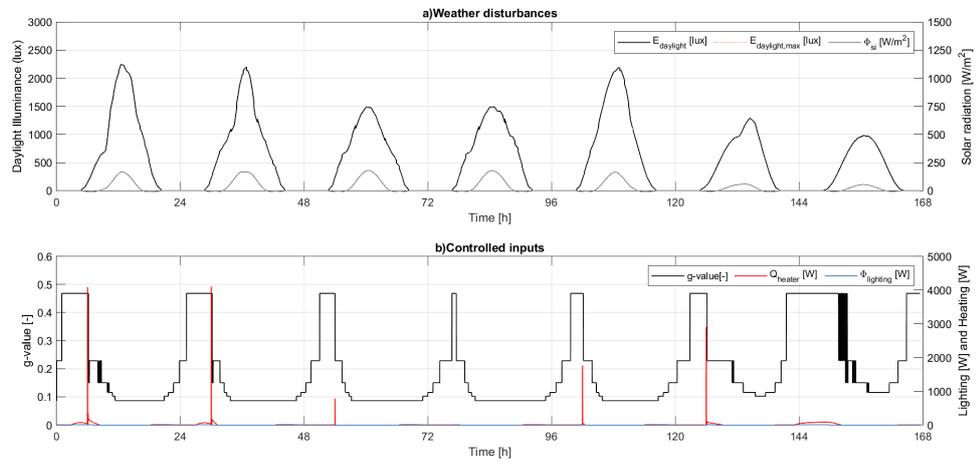


Figure 5.40: Predictive Rule-Based Control Temperature Giugno

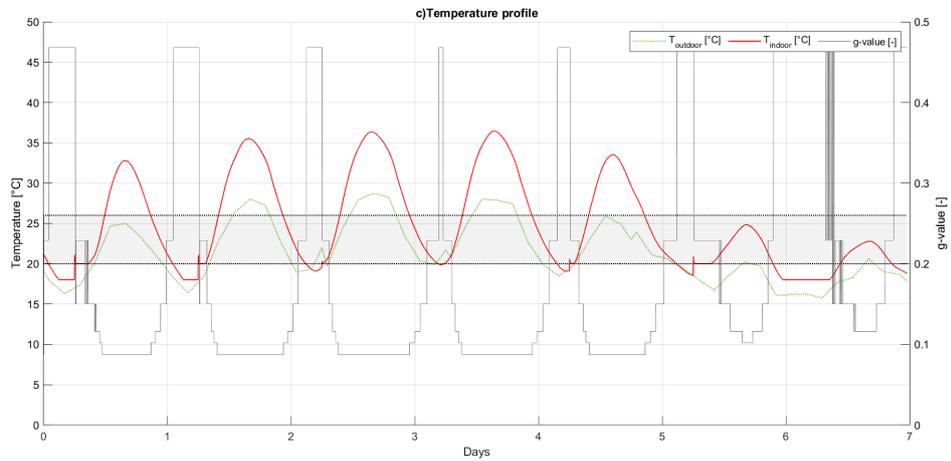
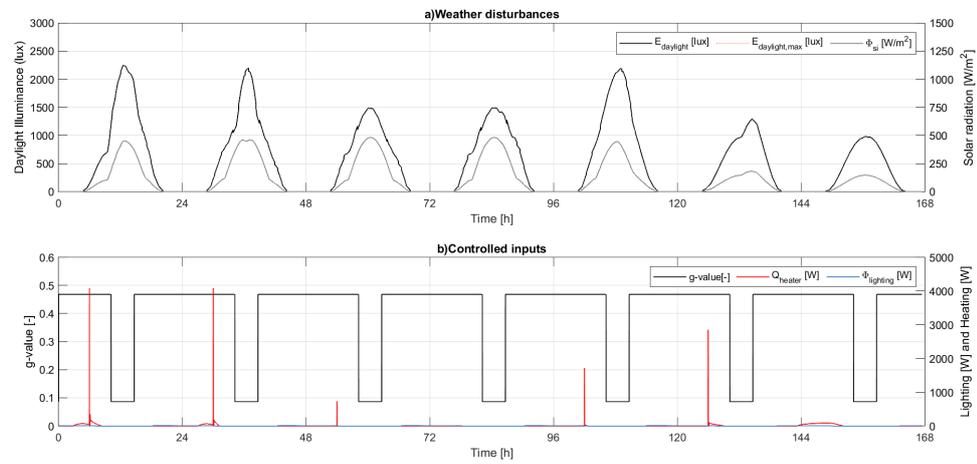
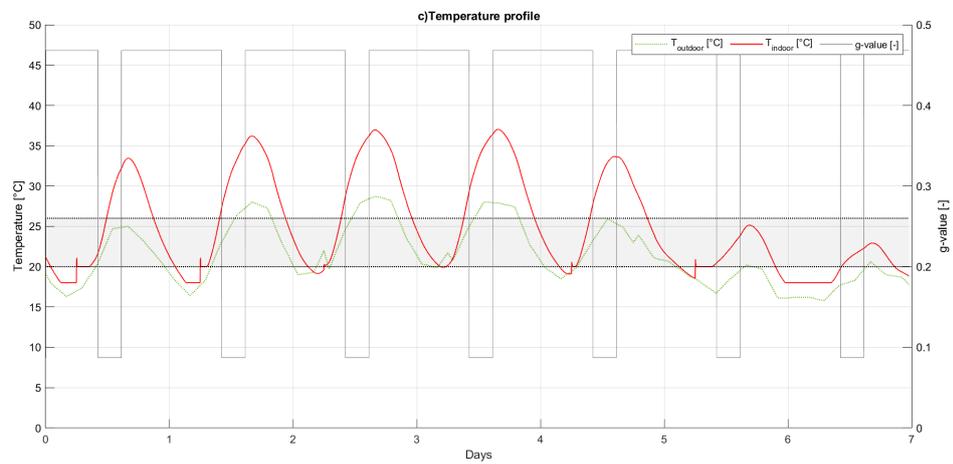


Figure 5.41: Predictive Rule-Based Control Temperature Profile temperature Giugno



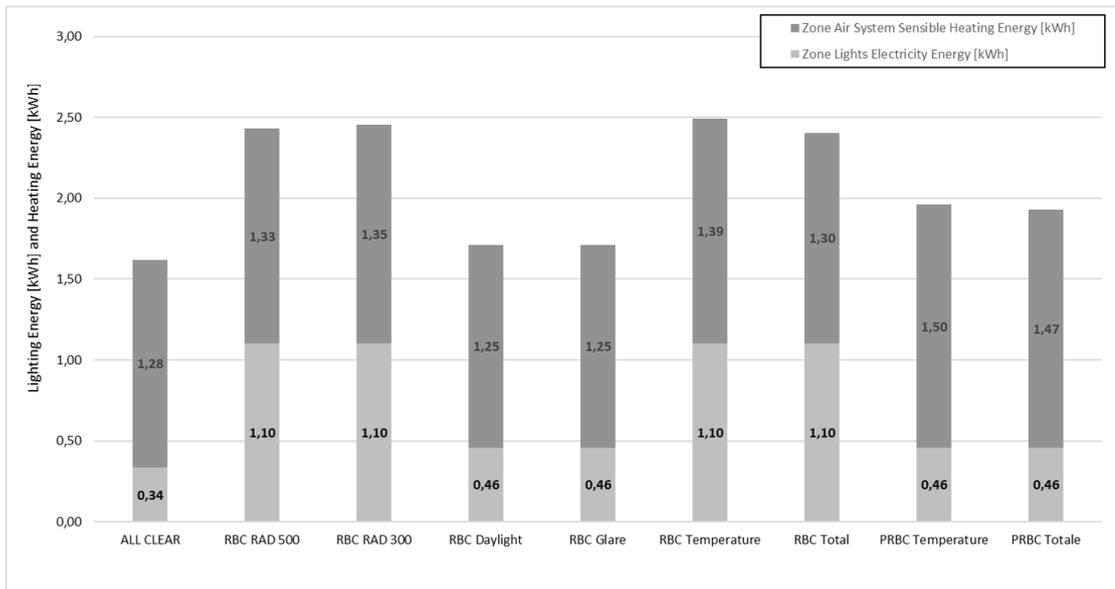
**Figure 5.42:** Predictive Rule-Based Control Totale Giugno



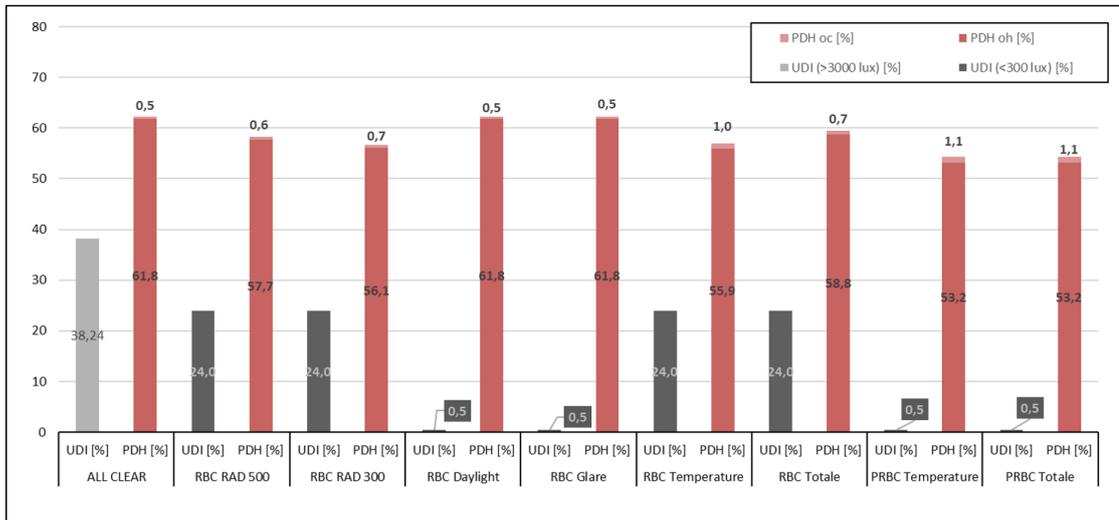
**Figure 5.43:** Predictive Rule-Based Control Totale Profilo temperature Giugno

Control	Total Energy [kWh]	$UDI_{fs}$ [%]	$UDI_{exc}$ [%]	PDH [%]	$DH_{oc}$	$DH_{oh}$
ALL CLEAR	1.6	0	38.4	62.3	0.05	430.4
RBC RAD 500	2.4	23.9	0	58.3	0.1	258.2
RBC RAD 300	2.5	23.9	0	56.7	0.1	232.5
RBC Daylight	1.7	0.5	0	62.3	0.05	430.4
RBC Glare	1.7	0.5	0	62.3	0.06	430.4
RBC Temperature	2.5	23.9	0	56.9	0.2	229.6
RBC Total	2.4	23.9	0	59.4	0.1	365.4
PRBC Temperature	1.9	0.5	0	54.3	0.2	207.15
PRBC Totale	1.9	0.5	0	55.7	0.2	224.7

**Table 5.3:** Confronto performance dei controlli per Giugno



**Figure 5.44:** Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Giugno



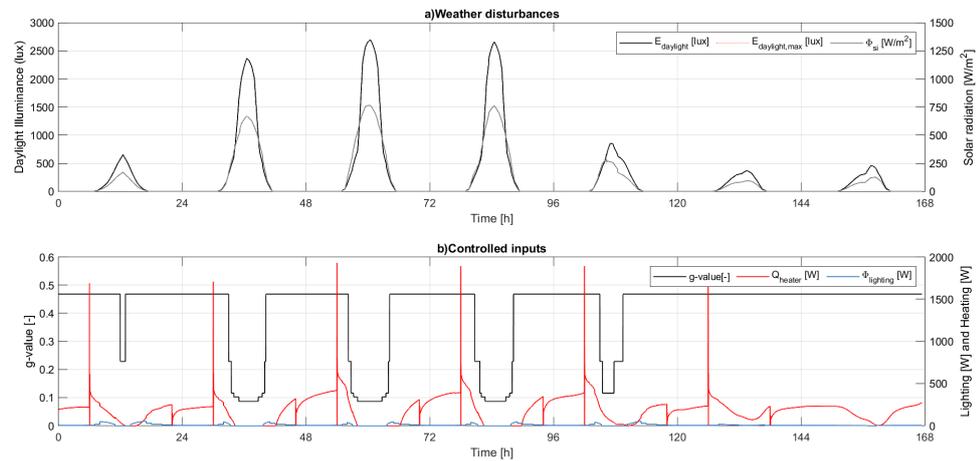
**Figure 5.45:** Confronto parametri per il comfort termico e visivo Giugno

In Tabella 5.3  $UDI_{exc}$  ed  $UDI_{fs}$  indicano rispettivamente  $UDI-exceeded (>3000 lux)$  ed  $UDI-fell short (<300 lux)$

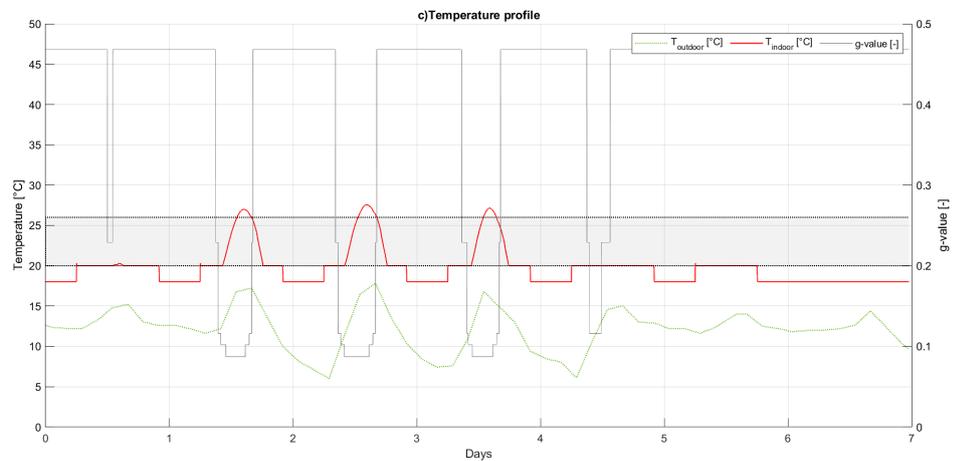
Per analizzare i dati relativi alla settimana estiva di Giugno bisogna tenere in considerazione che le simulazioni effettuate sul modello energetico rappresentano il caso reale, non è presente un impianto di raffrescamento. Pur implementando controlli mirati a ridurre la temperatura in cella, si ha come limitazione l'assenza dell'impianto, che non permette di visualizzare risultati pienamente soddisfacenti. Inoltre si ha una potenza consumata dall'impianto di riscaldamento in quanto, trovandosi la cella di prova sul tetto del Dipartimento, ed essendo costruita con materiali leggeri e non molto isolanti, se di notte la temperatura esterna scende, allora anche quella interna della cella diminuisce anche al di sotto del valore limite di set-point considerato per il comfort termico. I controlli PRBC sono quelli che consumano meno energia per il riscaldamento, oltre che al controllo di benchmark, ma allo stesso tempo sono tra quelli che consumano più energia per l'illuminamento, insieme ai controlli RB sulla radiazione solare in ingresso, perché per mantenere la temperatura il più bassa possibile, si ha uno scurimento dei vetri, che non permettono l'ingresso della radiazione solare. Ovviamente il controllo PRBC Totale, essendo basato anche sul soddisfacimento delle condizioni di comfort visivo, ha un consumo energetico per illuminamento minore rispetto al controllo PRBC sulla temperatura, ma comunque più alto rispetto al suo corrispettivo Rule Based a causa dello scurimento preventivo dei vetri dato dalle previsioni sulla temperatura e sull'illuminamento orizzontale e verticale futuro.

### 5.8.4 Ottobre

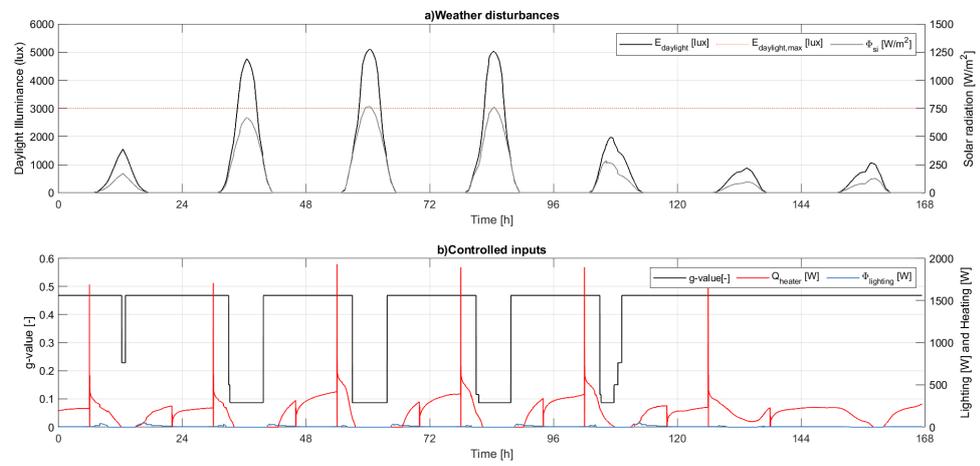
Sono rappresentati i risultati di alcune strategie Rule Based, *Rad 500*, *Glare e Temperature* e strategie Predictive Rule-Based Control sul Temperature e Totale, per la settimana che va dal 20 al 26 Ottobre a Torino.



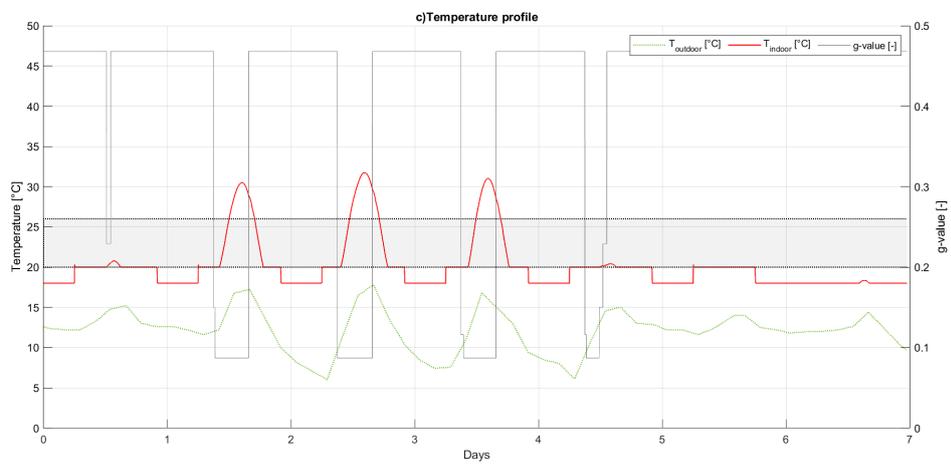
**Figure 5.46:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500 Control* Ottobre



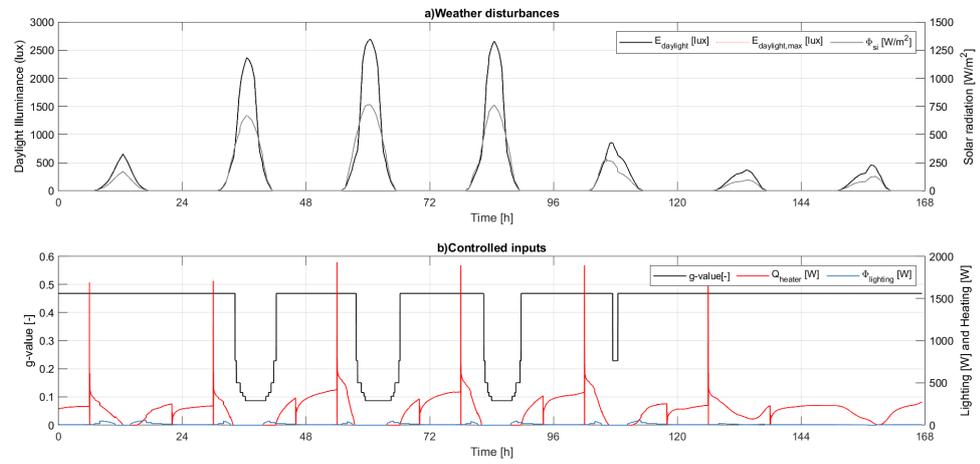
**Figure 5.47:** Rule Base Control basato sulla radiazione solare incidente *Rad 500 Control* Profilo temperature Ottobre



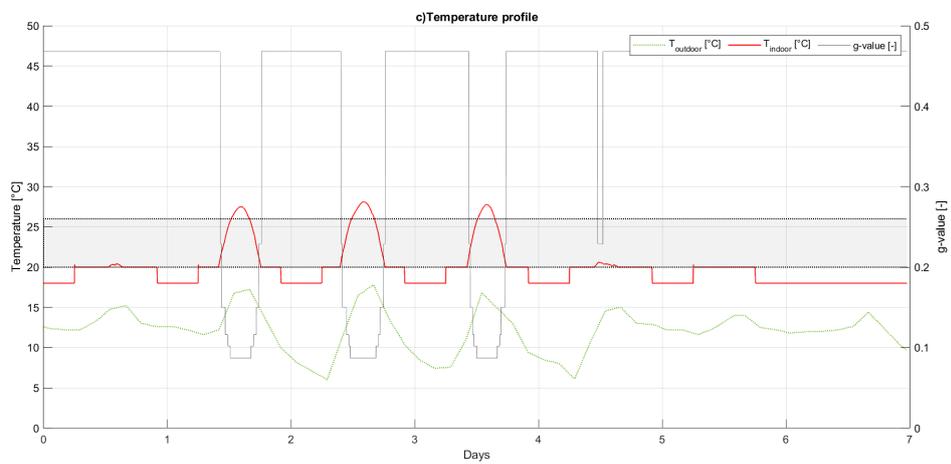
**Figure 5.48:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Ottobre



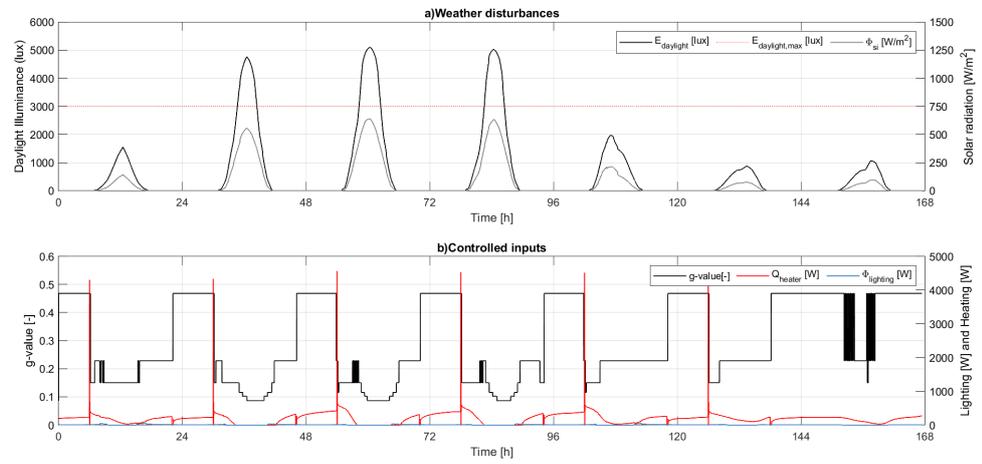
**Figure 5.49:** Rule Base Control basato sull'illuminamento verticale *Glare Control* Profilo temperature Ottobre



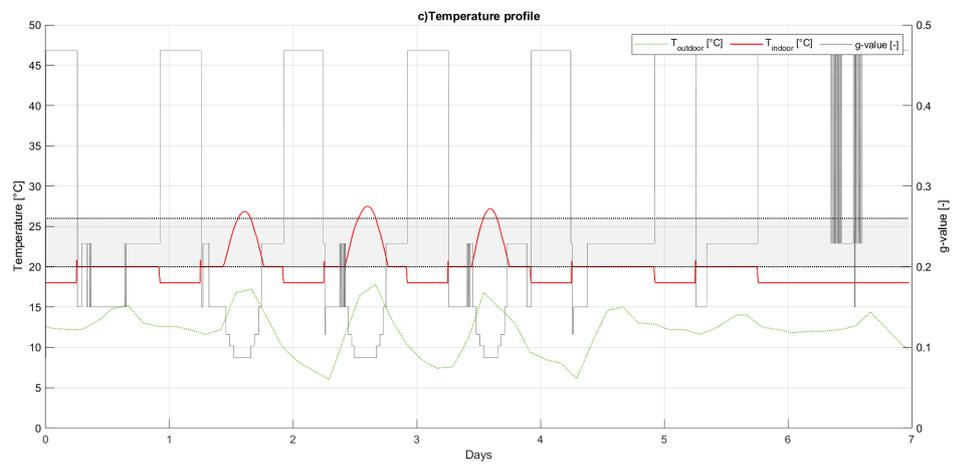
**Figure 5.50:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Ottobre



**Figure 5.51:** Rule Base Control basato sulla temperatura interna *Temperature Control* Profilo temperature Ottobre



**Figure 5.52:** Predictive Rule-Based Control Temperature Ottobre



**Figure 5.53:** Predictive Rule-Based Control Temperature Profile temperature Ottobre

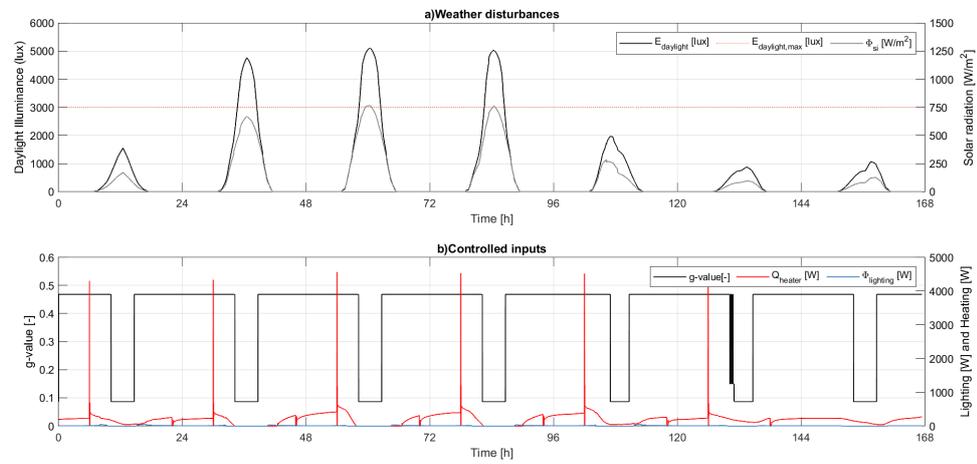


Figure 5.54: Predictive Rule-Based Control Totale Ottobre

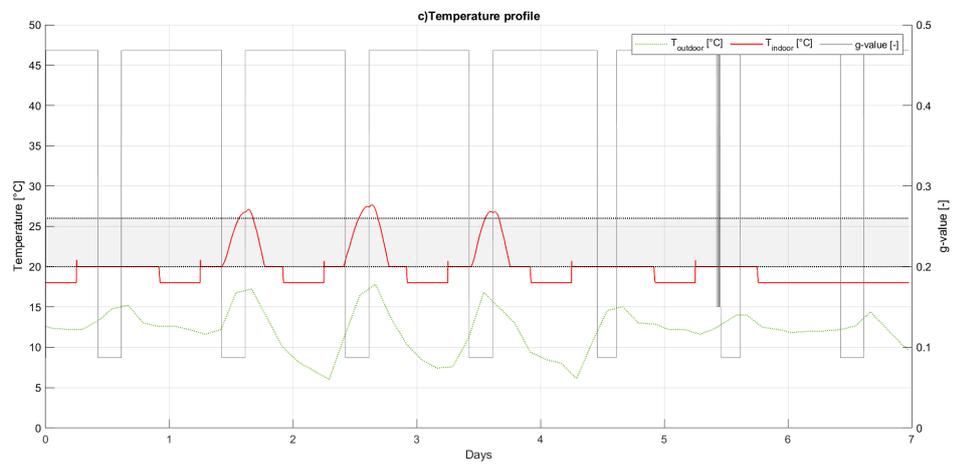
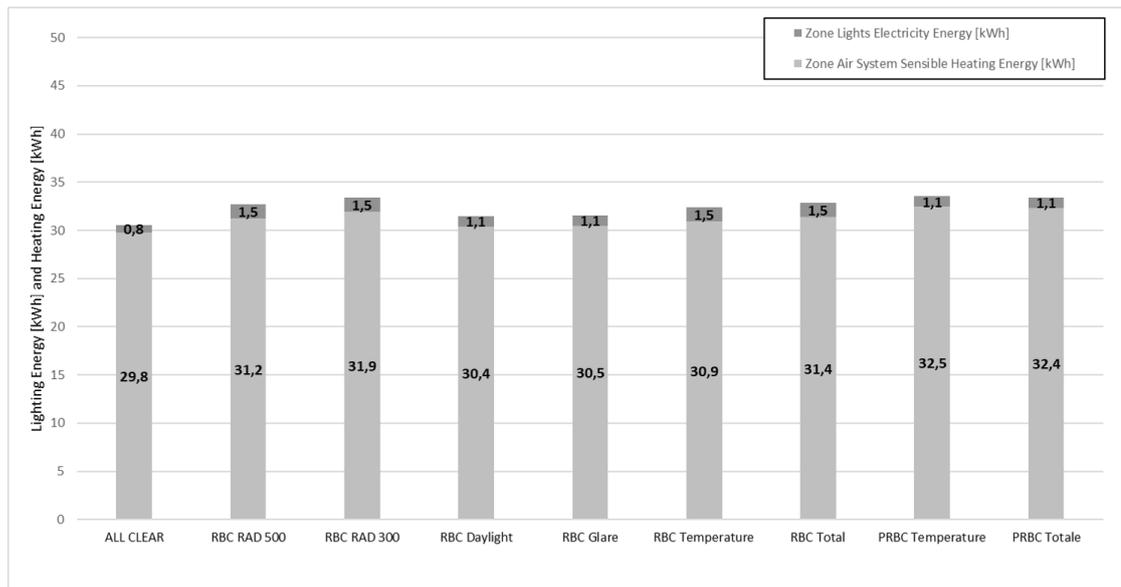


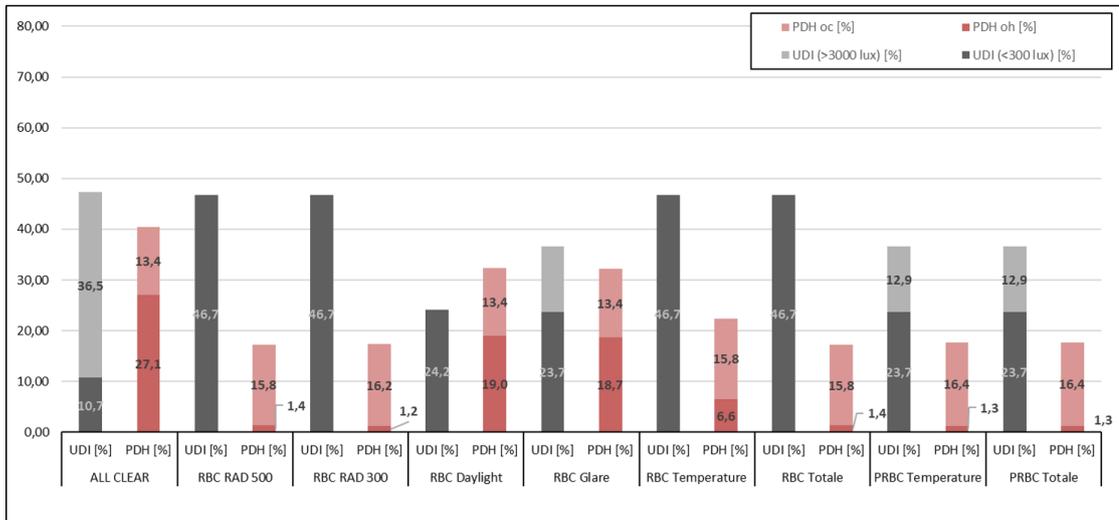
Figure 5.55: Predictive Rule-Based Control Totale Profilo temperature Ottobre

Control	Total Energy [kWh]	$UDI_{fs}$ [%]	$UDI_{exc}$ [%]	PDH [%]	$DH_{oc}$	$DH_{oh}$
ALL CLEAR	30.6	10.7	36.6	40.5	7.6	149.2
RBC RAD 500	32.7	46.7	0	17.2	8.7	0.1
RBC RAD 300	33.4	46.7	0	17.4	9.6	0.06
RBC Daylight	31.5	24.2	0	32.4	7.5	34.5
RBC Glare	31.5	23.7	13	32.1	7.6	33.5
RBC Temperature	32.4	46.7	0	22.4	8.7	1.6
RBC Total	32.9	46.7	0	17.2	8.8	0.1
PRBC Temperature	33.5	23.7	13	17.7	10.1	0.06
PRBC Totale	33.4	23.7	13	18.5	10.6	0.2

**Table 5.4:** Confronto performance dei controlli per Ottobre



**Figure 5.56:** Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento Ottobre



**Figure 5.57:** Confronto parametri per il comfort termico e visivo Ottobre

In Tabella 5.4  $UDI_{exc}$  ed  $UDI_{fs}$  indicano rispettivamente *UDI-exceeded* (>3000 lux) ed *UDI-fell short* (<300 lux)

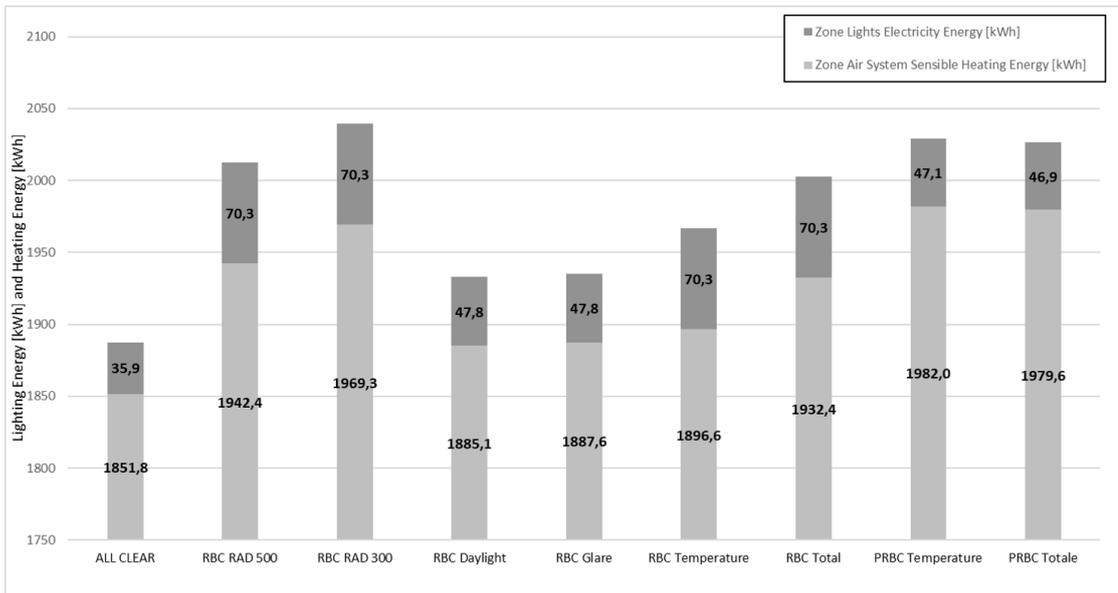
Nella settimana di Ottobre, dalla Figura 5.57, si nota come i controlli predittivi basati uno sulla temperatura ed uno sul controllo totale di temperatura, daylight e glare, sono in grado di diminuire l'indice di discomfort termico PDH per l'overheating, ma allo stesso tempo, come per marzo e gennaio, fanno aumentare l'indice di discomfort termico per l'overcooling e di conseguenza l'energia richiesta totale dell'impianto aumenta di 1kWh. Per quanto riguarda il controllo del Daylight e Glare, come riportato in Tabella 5.4, l'indice di discomfort UDI ha una riduzione del 10% con i controlli predittivi.

### 5.8.5 Simulazione Annuale

In questa sezione sono riportati i confronti tra i parametri di prestazione energetica ottenuti con l'implementazione dei controlli descritti precedentemente. I risultati riportati fanno riferimento alle quattro settimane considerate e all'anno di simulazione effettuato. I parametri da tenere in conto e confrontare sono l'UDI (*Useful Daylight Illuminance*), il PDH (*Percentage of Discomfort Hours*) e l'energia totale richiesta dall'impianto di riscaldamento e dal sistema di illuminazione. Si è aggiunta un'ulteriore variabile, che aiuta ad identificare la strategia di controllo con il risparmio energetico più elevato, ed è il *P-bench* ovvero il risparmio rispetto al controllo di riferimento *All Clear*.

Control	Total Energy [kWh]	$UDI_{fs}$ [%]	$UDI_{exc}$ [%]	PDH [%]	$DH_{oc}$	$DH_{oh}$	P-bench [%]
ALL CLEAR	1887.6	6.7	54.8	58.1	496.7	18213	0
RBC RAD500	2012.7	32.3	2.9	48.4	597.5	6386	-6.6
RBC RAD300	2039.6	32.3	2.9	48.2	634.8	6032	-8.1
RBC Daylight	1932.9	14.9	15.3	54.5	524.5	12036	-2.4
RBC Glare	1935.3	14.9	15.3	54.4	527.7	11973	-2.5
RBC Temp	1966.9	32.3	2.9	46.4	544	6165	-4.2
RBC Total	2002.7	32.3	2.9	50.6	592.7	7991	-6.1
PRBC Temp	2029.1	14.9	15.3	47.6	663.3	5645	-7.5
PRBC Totale	2026.5	14.9	15.3	49.3	679.8	6488	-7.4

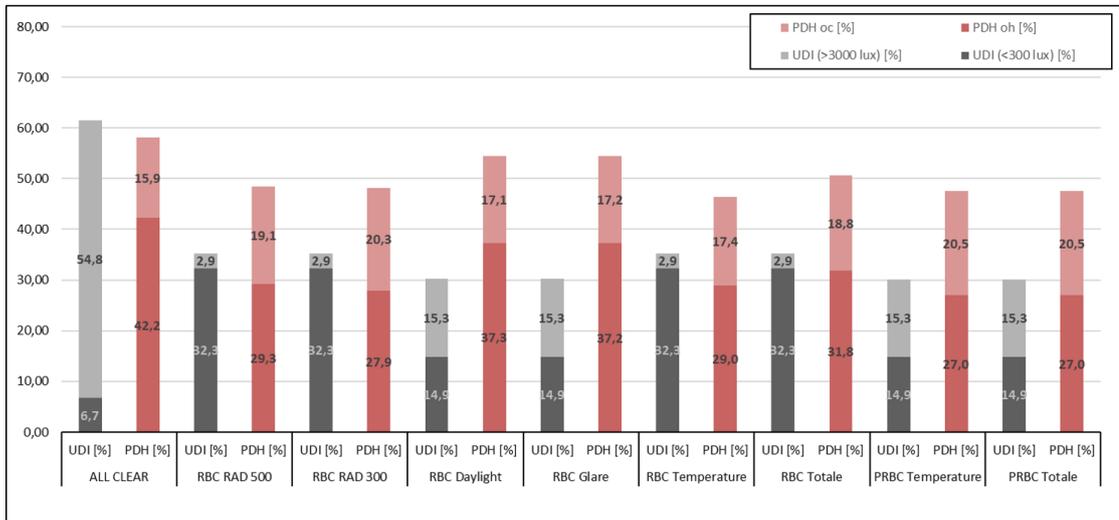
**Table 5.5:** Confronto performance dei controlli annuale



**Figure 5.58:** Confronto energia richiesta per riscaldamento ed illuminamento annuo

In Tabella 5.5  $UDI_{exc}$  ed  $UDI_{fs}$  indicano rispettivamente *UDI-exceeded* ( $>3000$  lux) ed *UDI-fell short* ( $<300$  lux)

Nella Tabella 5.5 sono mostrati i risultati ottenuti con l'implementazione di tutti i controlli su un anno di simulazione, considerando sempre solo la presenza di impianto di riscaldamento ed illuminazione. A causa dell'assenza dell'impianto di raffrescamento non è possibile notare i benefici che porterebbe l'utilizzo del



**Figure 5.59:** Confronto parametri per il comfort termico e visivo annuo

controllo *PRBC* nel periodo estivo. Tra i controlli Rule Based quelli che hanno una prestazione energetica migliore rispetto ai controlli basati sulla radiazione solare incidente sono quelli *Daylight* e *Glare*. Se si considerano i parametri di discomfort visivo, i controlli di tipo predittivo riescono a diminuire del 5% rispetto ai controlli corrispondenti Rule Based semplici il parametro UDI, arrivando ad un valore del 30% circa, la metà rispetto al 62% che si ha con il controllo di riferimento. Per quanto riguarda invece i parametri di discomfort termico PDH, ci si aspettavano valori più bassi per i controlli predittivi, ma sono abbastanza costanti nel totale, poiché se si ricava vantaggio dalla diminuzione del surriscaldamento dell'ambiente interno, si ottiene contemporaneamente del sottoraffreddamento a causa del prematuro scurimento dei vetri, soprattutto nei mesi con temperature esterne basse.

Tra i risultati attesi sicuramente ci si aspettavano valori di risparmio energetico maggiore per i controlli predittivi, ma se si andasse a studiare un caso con la presenza di un impianto di raffrescamento si verificherebbe tale condizione.

In conclusione si può affermare che l'overheating è sufficientemente controllato con i metodi di controllo predittivi, di conseguenza si hanno problemi di overcooling a causa dei vetri scuri in anticipo rispetto a quando si dovrebbe avere la temperatura. In generale con i valori ottenuti si possono considerare i vetri elettrocromici abbastanza performanti, ma probabilmente non troppo competitivi dal punto di vista economico. Se nel sistema vetrato non fosse presente il vetro statico, la cella fosse termicamente più isolata e ci fosse anche un impianto di riscaldamento e raffrescamento regolabile allora le prestazioni sarebbero notevolmente migliori, come dimostrato in vari studi [6, 54, 5].

## Chapter 6

# Conclusione e sviluppi

L'obiettivo principale del lavoro di tesi è stato quello di creare ed implementare strategie di controllo avanzate per i vetri elettrocromici, in modo da poterli implementare sperimentalmente presso la cella di prova del Politecnico di Torino.

L'attività sperimentale ha permesso la caratterizzazione delle proprietà fisiche dei componenti della cella di prova, che ha consentito l'ottimizzazione del modello energetico utilizzato per le simulazioni numeriche. Lo scopo principale della creazione delle varie strategie è il controllo automatico in tempo reale delle proprietà termo-ottiche dei vetri elettrocromici installati nella cella, in modo da poter effettuare la valutazione delle condizioni di comfort termico e visivo all'interno dell'ambiente della cella, considerando l'effetto della radiazione solare incidente su un occupante posizionato ad un metro dalla facciata vetrata.

Modificando le proprietà termo-ottiche dei vetri si riesce a studiare il complesso rapporto presente fra il fabbisogno di illuminamento e quello di riscaldamento. Infatti nel momento in cui si ha uno stato completamente chiaro dei vetri allora si ottiene un aumento della quantità di luce naturale entrante nell'ambiente, portando ad una diminuzione del bisogno di illuminamento e di riscaldamento; allo stesso tempo maggiori apporti solari gratuiti provocano un aumento della temperatura interna, quindi un possibile discomfort termico nei mesi estivi, a causa della mancanza di un impianto di raffrescamento (il quale comunque avrebbe avuto un aumento di potenza utilizzata).

L'identificazione di due modelli ridotti a partire da dati di simulazione del modello energetico creato su EnergyPlus, permette di implementare controlli in tempo reale di tipo Model Based. Per sfruttare le funzionalità dei vetri elettrocromici, sono stati implementati dei controlli basati sulla radiazione solare, sull'illuminamento verticale ed orizzontale e sulla temperatura. Successivamente sono stati valutati i parametri di performance energetica sia dei controlli di tipo Rule Based, che di quelli Model Based, tramite delle simulazioni su quattro settimane più indicative per ogni stagione e simulazioni annuali.

Gli obiettivi raggiunti sono stati: la creazione di due modelli a parametri concentrati, *grey-box*, sulla base di un modello di tipo deterministico *white-box*, che possono e saranno utilizzati per sviluppare controlli sperimentali; la validità del modello ridotto nel controllare i vetri elettrocromici ed infine lo studio di strategie di controllo avanzate per i vetri dinamici.

Per quanto riguarda le strategie di controllo implementate si può concludere che a livello energetico nessun controllo di tipo Rule Based o Predictive Rule Based, comporta un miglioramento del fabbisogno energetico, perchè ovviamente, nei casi invernali si può controllare lo stato del vetro modulando la radiazione solare entrante, ma il bisogno di riscaldamento rimane. Allo stesso tempo nei casi estivi, senza un impianto di raffrescamento, seppur modulando la radiazione solare incidente, non si riesce a controllare la temperatura interna.

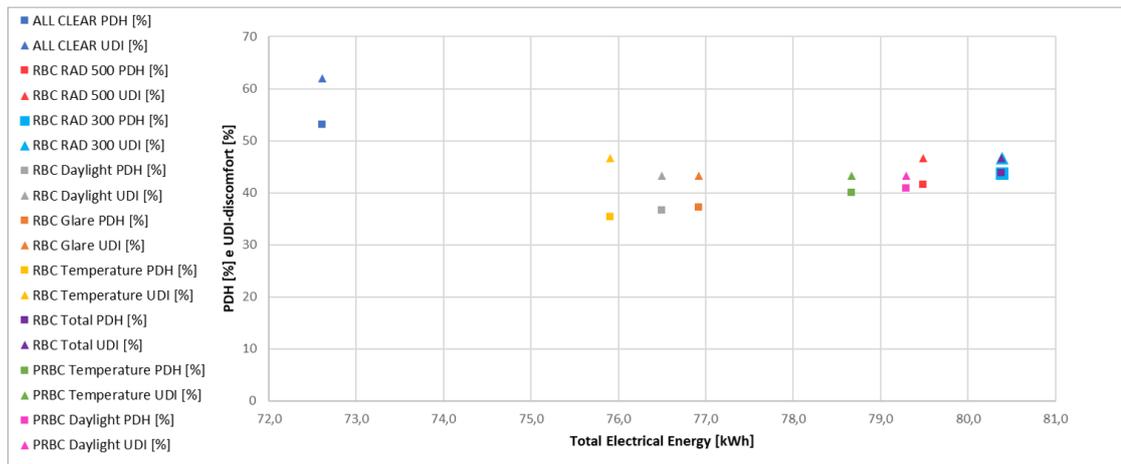
Da questo lavoro si può dedurre la convenienza dell'utilizzo dei vetri elettrocromici rispetto agli statici, dai parametri di comfort termico e visivo. Un controllo Rule Based semplice effettuato sulla radiazione solare porta ad una riduzione del 20% circa del fattore PDH (*Percentage Discomfort Hours*) rispetto al controllo di riferimento *All Clear* ed a una riduzione del 43% del fattore di discomfort visivo UDI *Useful Daylight Illuminance*.

Analizzando separatamente i risultati ottenuti per ogni stagione climatica si notano diversi comportamenti:

1. Facendo uso dei controlli Rule Based sul *Temperature* e *Total*, si riesce a ridurre la percentuale di ore passate con la temperatura operativa al di fuori del range di comfort, rispettivamente del 59% e del 51% per il mese di Marzo e di circa il 45% e del 58% per il mese di Ottobre.
2. Nei mesi di Gennaio, Marzo, Giugno ed Ottobre con le strategie di controllo specifiche per il comfort visivo si aumenta la percentuale di radiazione utile all'illuminamento rispettivamente di circa il 31%, del 63%, del 99% e del 49%. I valori variano molto in base al periodo considerato in quanto cambia il valore dell'angolo solare, ed essendo il controllo direttamente dipendente da questo allora considera diversamente la quantità di radiazione entrante.
3. Per quanto riguarda i controlli predittivi nel mese di Gennaio si aumenta l'illuminamento utile nel range di comfort del 30% e si diminuisce il fattore di discomfort termico del 25%; nel mese di Marzo si ha in media il 60% in più di illuminamento utile ed il 60% in meno di discomfort termico; per Giugno di ha quasi il 100% di riduzione del parametro di discomfort visivo ed il 13% di quello termico (valore ridotto a causa della mancanza di un impianto di raffrescamento); ed infine per il mese di Ottobre si ha una diminuzione dei parametri di discomfort visivo e termico di rispettivamente del 23% e del 55%.

Nel sistema analizzato si precisa che l'energia per il sistema di riscaldamento è considerata energia elettrica, in quanto l'impianto di riscaldamento, considerando il caso reale della cella di prova, è costituito da un termoventilatore collegato alla presa elettrica. Questa assunzione permette di sommare l'energia elettrica spesa per il riscaldamento a quella spesa per il sistema di illuminazione.

Sono stati rappresentati i vari controlli implementati su grafici che hanno in ascissa l'energia totale elettrica richiesta dal sistema ed in ordinata le percentuali che indicano i parametri di discomfort visivo (la somma dell'*UDI-exceeded* e dell'*UDI-fell short*) e termico.



**Figure 6.1:** Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Gennaio

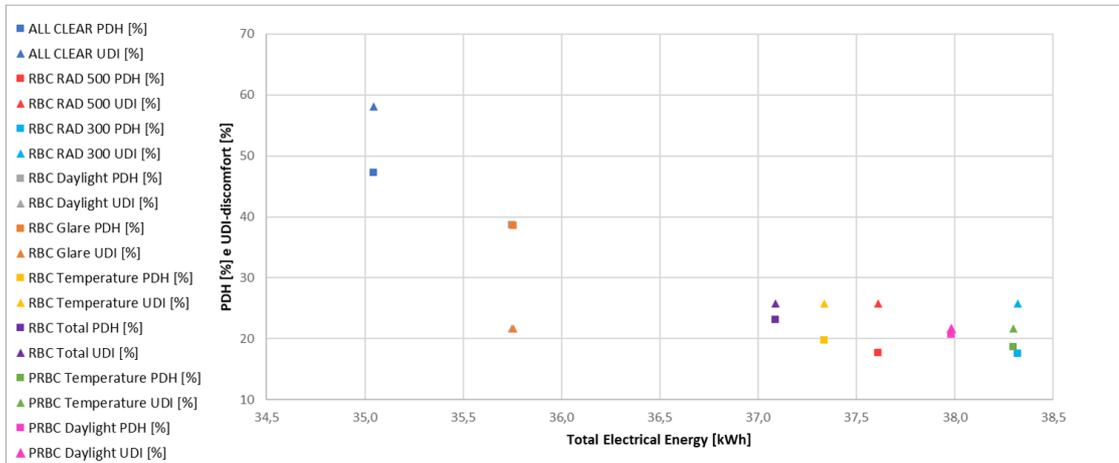


Figure 6.2: Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Marzo

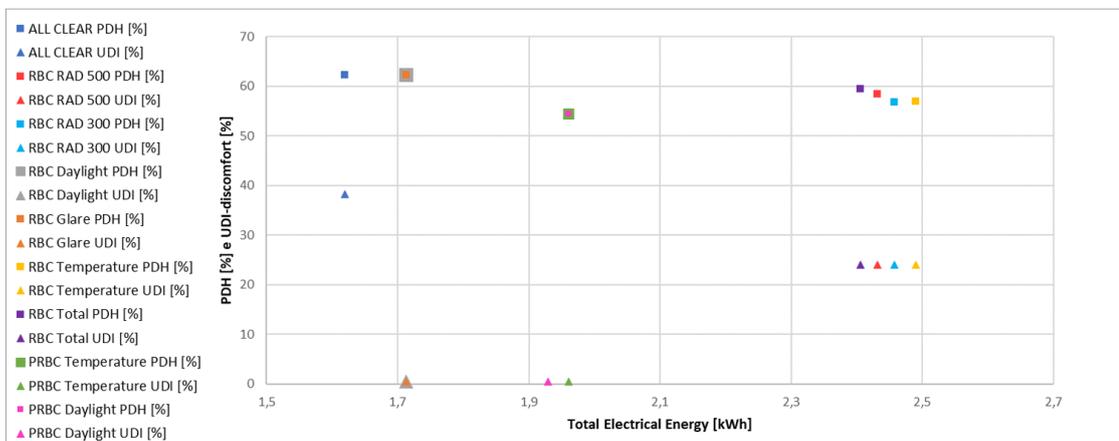
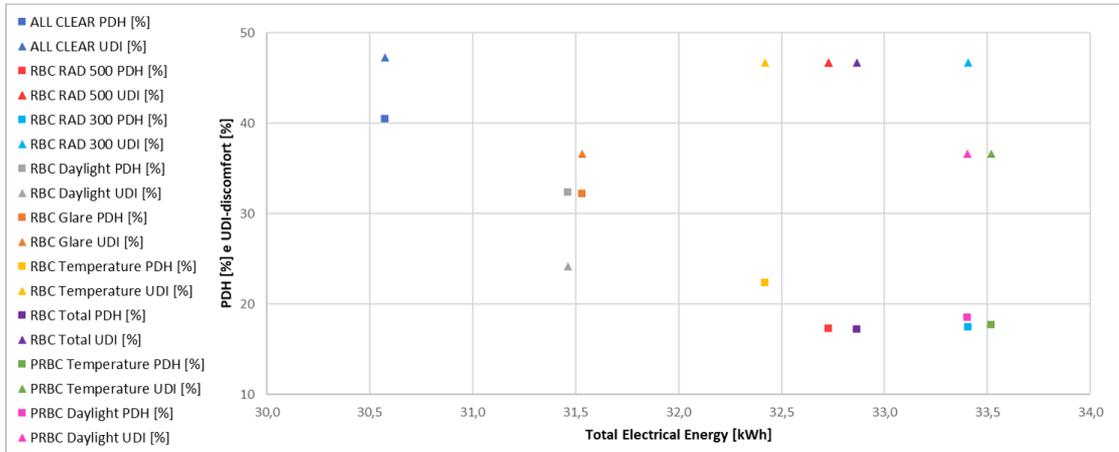
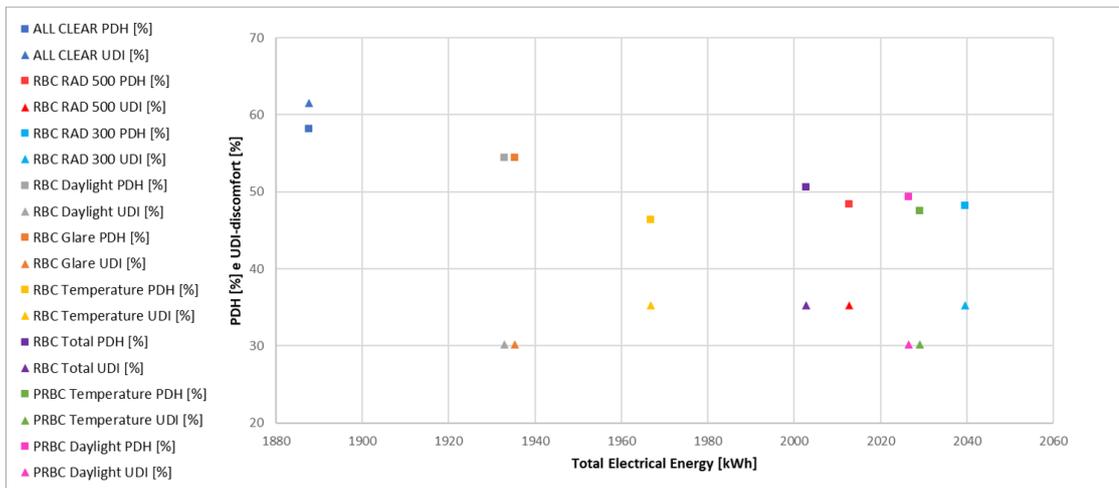


Figure 6.3: Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Giugno



**Figure 6.4:** Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Ottobre



**Figure 6.5:** Rappresentazione parametri discomfort in funzione dell'energia totale elettrica richiesta delle strategie di controllo - Annuale

Da Figura 6.1, Figura 6.2, Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5, si nota che per ogni stagione si hanno delle strategie più o meno performanti, in quanto si hanno condizioni al contorno differenti (temperatura esterna, radiazione solare incidente, altezza solare).

Per il mese di Gennaio il controllo Rule Based sulla temperatura è quello che ha un consumo energetico minore con discomfort termico minore, ma il controllo predittivo sulla temperatura consumerebbe solo 3 kWh con circa gli stessi parametri per il discomfort termico e visivo.

Per il mese di Marzo i controlli Rule Based sul glare e sul Daylight sono quelli con minor consumo di energia, ma hanno alti parametri di discomfort rispetto a tutti gli altri controlli. I controlli predittivi hanno i valori di PDH e UDI più bassi, ma con un consumo energetico maggiore. La situazione per i mesi di Giugno ed Ottobre è molto simile.

In generale, facendo riferimento alla figura rappresentante la situazione annuale, con il caso studiato in questa tesi, si ottengono parametri di discomfort minori per i controlli PRBC, ma con un consumo energetico maggiore, rispetto ai controlli RBC su Glare e Daylight, i quali hanno parametri di discomfort maggiore.

## 6.1 Sviluppi futuri

Nei lavori futuri si può pensare di implementare dei controlli avanzati, come l'MPC, basati sul controllo indipendente dei vetri, in modo da riuscire a migliorare i parametri di comfort termico e visivo e ridurre il fabbisogno di illuminamento.

La performance dei controlli di tipo predittivo nel campo del comfort visivo e termico però può essere discordante. Nel caso in cui venisse implementato un metodo in grado di predire la temperatura molti timestep prima e il controllo prevedesse lo scurimento dei vetri elettrocromici già da quell'istante, allora si avrebbe sicuramente un miglioramento del comfort termico, in quanto la temperatura non dovrebbe raggiungere valori elevati, ma avendo i vetri in uno stato scuro provocherebbe una perdita di radiazione solare disponibile e quindi un aumento di discomfort visivo. Quindi, in un caso estivo si riuscirebbe a controllare l'overheating ed il glare ma si potrebbero avere problemi con illuminamento minore di 300 lux.

Sicuramente dei controlli di questo tipo potrebbero avere più effetto nelle stagioni invernali, piuttosto che in quelle primaverili o autunnali, in quanto in questo particolare caso, senza impianto di raffrescamento in estate non è possibile controllare di molto la temperatura senza perdere illuminamento disponibile.

Infine dovranno essere implementati in campo dei controlli real-time dei vetri elettrocromici, in modo da poter verificare il risparmio energetico effettivamente ottenibile.

# Appendix A

## Controlli

Codice per il controllo con schedule dei vetri e dell'heater sul Raspberry-Py

```
1 from datetime import datetime
2 import controllo_noemi as controllo
3 # import comando_heater_prova as controllo_heater
4 import time
5 import pandas as pd
6 import os
7 from datetime import date
8
9
10 folder_BK = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT\Backup'
11 folder_CL = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT\Clean'
12 folder_CN = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT\Control'
13 folder_ST = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT'
14 folder_sch_Halio= r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT\
    Schedules Halio'
15 folder_sch_Heater= r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT\
    Schedules Heater'
16 col='Pyra_Out_Vert (W/m2)'
17
18 df= pd.read_csv(r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\Politecnico\Tesi\
    Dati excel\Matrix.csv', index_col=('Datetime'), dayfirst=True,
    delimiter=';', parse_dates=(True))
19 # print(df)
20
21 halio_sch=df['Schedule Halio']
22 heater_sch=df['Schedule Heater']
23
24 while True:
25
```

```

26     for label ,row in df.iterrows() :
27
28         if (date.today()) == label :
29             # print(label)
30             # print(row)
31             filename_halio=r''+halio_sch[label]
32             SCH_mgmt=controllo.Controllo(folder_CN ,folder_sch_Halio)
33             SCH_mgmt.sch_control(filename_halio ,15) #timestep
34         controllo
35
36             # filename_heater=r''+heater_sch[label]
37             # HEATER_mgmt=controllo_heater.Heater(folder_CN ,
38             folder_sch_Heater)
39             # HEATER_mgmt.sch_heater(filename_heater ,15)
40
41             filename=r'test.csv'
42             c=controllo.Halio(folder_CN ,filename)
43             c.comando_Halio()
44             #c.Halio_state(folder_CL)
45             print("Done" ,datetime.now())
46             time.sleep(30)

```

## Codice per l'elaborazione dati acquisiti dal DataTaker

```
1 import pandas as pd
2 import os
3 import numpy as np
4 from numpy import inf
5 import requests
6 import time
7 import glob
8 import ftplib
9 import csv
10 from datetime import datetime
11 import math as mt
12 import datetime
13 from pysolar.solar import get_altitude
14 from pysolar.solar import get_azimuth
15
16 from dateutil import tz
17 tz1=tz.gettz()
18
19
20 class Elab:
21     def __init__ (self , folder_BK , folder_CL , folder_CN , col ):
22         self.folder_BK=folder_BK    #backup dei dati
23         self.folder_CL=folder_CL    #
24         self.folder_CN=folder_CN    #
25         self.col=col
26         os.chdir(folder_BK)
27
28         #funziona che elimina i dati una volta elaborati
29
30     def elimina_file(self , folder_remove , file_remove_type):
31         files = [f for f in os.listdir(folder_remove) if f.endswith(
32 file_remove_type)]
33         for file in files:
34             os.remove(file)
35
36         #funzioni che creano la media di alcune temperature
37
38     def media (self , file_type , folder , copy):    #,name,form
39
40         os.chdir(folder)
41
42         self.filename=(glob.glob(file_type))
43         self.fln=os.path.splitext(self.filename[0])
44         self.data=pd.read_csv(self.filename[0]) #apre solo il file
45         senza _done
```

```

45     global flag
46
47     flag=0
48     if len(self.data)<1:
49         os.remove (self.filename[0])
50         flag=1
51
52
53     if flag==0:
54
55         #fare la media della T aria interna
56         self.data['Ti_mean (degC)']=(pd.DataFrame(self.data ,
columns=['Tai_1 (degC)', 'Tai_2 (degC)', 'Tai_3 (degC)']).mean(axis
=1) #axis=1-> media per righe'
57         #fare la media della T floor interna
58         self.data['Tsi_Floor (degC)']=(pd.DataFrame(self.data ,
columns=['Tsi_floor_1 (degC)', 'Tsi_floor_2 (degC)', 'Tsi_Floor_3 (
degC)']).mean(axis=1)
59         #fare la media della T west interna
60         self.data['Tsi_West (degC)']=(pd.DataFrame(self.data ,
columns=['Tsi_W_West_1 (degC)', 'Tsi_West_2 (degC)']).mean(axis=1)
61         #fare la media della T east interna
62         self.data['Tsi_East (degC)']=(pd.DataFrame(self.data ,
columns=['Tsi_W_East_2 (degC)', 'Tsi_East_1 (degC)']).mean(axis=1)
63         #fare la media della T ceiling interna
64         self.data['Tsi_Ceiling (degC)']=(pd.DataFrame(self.
data , columns=['Tsi_Ceiling_1 (degC)', 'Tsi_Ceiling_2 (degC)']).
mean(axis=1)
65
66         #creare nuovo file -> elimina colonne non più necessarie
e cambia ordine
67
68         self.data=(pd.DataFrame(self.data , columns=['Timestamp'
, 'Ti_mean (degC)', 'Tout (degC)', 'HF_SG (W/m2)', 'HF_EC1 (W/m2)', '
HF_EC2 (W/m2)', 'HF_Floor (W/m2)',
69         'Tsi_Floor (degC)', 'Tse_Floor (degC)', 'HF_North (W/m2)', '
Tsi_North (degC)', 'Tse_North (degC)', 'Tsi_West (degC)', '
Tse_W_West (degC)',
70         'HF_East (W/m2)', 'Tsi_East (degC)', 'Tse_W_East (degC)', '
Tsi_Ceiling (degC)', 'Tsi_SG (degC)', 'Tse_SG (degC)', 'Tsi_EC1 (degC
)',
71         'Tse_EC1 (degC)', 'Tsi_EC2 (degC)', 'Tse_EC2 (degC)', '
Pyra_In_Vert_SG (W/m2)', 'Pyra_In_Vert_EC1 (W/m2)', '
Pyra_In_Vert_EC2 (W/m2)', 'Pyra_Out_Vert (W/m2)', 'Pyra_Out_Horiz (W
/m2)']))
72         #calcolo tau vetri (indica la stato del vetro)
73

```

```

74         pyras = [ 'Pyra_In_Vert_SG (W/m2)', 'Pyra_In_Vert_EC1 (W
/m2)', 'Pyra_In_Vert_EC2 (W/m2)', 'Pyra_Out_Vert (W/m2)', '
Pyra_Out_Horiz (W/m2)' ]
75         for p in pyras:
76             num_row = 0
77             col = self.data[p]
78             for val in col:
79                 if val < 0.1:
80                     self.data.loc[num_row, p] = 0
81             num_row += 1
82
83
84         self.data['T_SG'] = self.data['Pyra_In_Vert_SG (W/m2)'] /
self.data['Pyra_Out_Vert (W/m2)']
85         self.data['T_EC1'] = self.data['Pyra_In_Vert_EC1 (W/m2)']
]/ self.data['Pyra_Out_Vert (W/m2)']
86         self.data['T_EC2'] = self.data['Pyra_In_Vert_EC2 (W/m2)']
]/ self.data['Pyra_Out_Vert (W/m2)']
87
88
89         # -----
90         taus = [ 'T_SG', 'T_EC1', 'T_EC2' ]
91         for t in taus:
92             num_row = 0
93             col = self.data[t]
94             for val in col:
95                 if val == -inf:
96                     self.data.loc[num_row, t] = 0
97             num_row += 1
98
99
100        # -----
101        row = len(self.data)
102        time = (self.data['Timestamp'])[row - 1]
103        tau_1 = (self.data['T_EC1'])[row - 1]
104        tau_2 = (self.data['T_EC2'])[row - 1]
105
106        current_folder = os.getcwd()
107        # folder_phi = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO
\DT'
108
109        # filename_angolo = r'angolo_solare_novembre.csv'
110        # os.chdir(folder_phi)
111        # phi_N = pd.read_csv(filename_angolo)
112
113        def tau_phi(x):
114            x = mt.radians(x)
115            tau_cost = -0.002 + 2.813 * np.cos(x) - 2.341 * (
np.cos(x)) ** 2 - 0.05725 * (np.cos(x)) ** 3 + 0.599 * (np.cos(x))
** 4

```

```

115         return (tau_cost)
116
117         # datastep = " " + time[5:11] + " " + time[11:18] +
"0"
118         # rows, cols = phi_N.shape
119         rows=len(time)
120
121         # for xx in range(0, rows):
122         #     # if (phi_N['datetime'])[xx] == datastep: #A=
datetime
123         # db=time[xx]
124         hh=pd.to_datetime(time)
125
126         times=datetime.datetime.timestamp(hh)
127         date=datetime.datetime.fromtimestamp(times)
128         date=date.replace(tzinfo=tz1)
129         BETA=mt.radians(get_altitude(45.22, 7.65, date)) #
altezza solare
130         PSI=mt.radians(get_azimuth(45.22, 7.65, date)) #
azimuth del sole
131         if BETA>0 and PSI>mt.pi/2 and PSI<3/2*mt.pi:
132             TETA=mt.acos(mt.cos(BETA)*mt.cos(-mt.pi+PSI))
133
134         else:
135             TETA=mt.pi/2
136
137
138         # phi_now = (phi_N['phi'])[xx] #B=phi
139         # break
140
141         # else:
142         #     phi_now = 90
143
144
145         tau_cost = tau_phi(TETA)
146
147         tau_01 = tau_1 / tau_cost
148         tau_02 = tau_2 / tau_cost
149
150         self.data.loc[row - 1, 'TO_EC1'] = tau_01
151         self.data.loc[row - 1, 'TO_EC2'] = tau_02
152         # -----
153         taus_0 = ['TO_EC1', 'TO_EC2']
154         for t0 in taus_0:
155             num_row_0 = 0
156             col = self.data[t0]
157             for val in col:
158                 if val <0:
159                     self.data.loc[num_row_0, t0] = 0

```

```

160         num_row_0 += 1
161         # -----
162         os.chdir(current_folder)
163
164         #salvataggio file presenti all'interno del ftp in un
nuovo file
165
166     def backup_fpt(self):
167         ftp=ftplib.FTP(host='ftp.polito.it', user='ftp-denerg',
passwd='Denerg-TWINS-20$19')
168         ftp.login(user='ftp-denerg')
169         ftp.cwd('new_data_N') #change directory
170         ftpfiles=sorted(ftp.nlst()) #file list
171
172     def copia_ultima_riga (filename, folder_copia):
173         os.chdir(self.folder_BK)
174         data=pd.read_csv(filename)
175         os.chdir(folder_copia)
176         data_last=data.tail(1) #dataframe con solo l'ultima riga
177         data_last.to_csv(filename, index=False) #salva l'ultima
stringa
178         os.chdir(self.folder_BK)
179
180
181     def scrivi(more_data):
182         fp.write(more_data)
183         fp.write('\n')
184
185     for ftpfile in ftpfiles:
186         ftpfln=os.path.splitext(ftpfile)
187         ftpfln2=(ftpfln[0])[4:19]
188         if os.path.isfile('%s%s' %((ftpfln2)[0:19], ftpfln[1]))
or os.path.isfile('%s%s%s' %((ftpfln2)[0:19], '_done', ftpfln[1]))
:
189             #print((ftpfile) + ' already existing')
190             z=0
191         else:
192             with open ((ftpfln2 + ftpfln[1]), "w") as fp:
193                 res = ftp.retrlines('RETR ' + ftpfile, callback=
scrivi)
194                 print ((ftpfile) + ' download complete')
195
196                 filename=(ftpfln2 + ftpfln[1])
197                 copia_ultima_riga(filename, self.folder_CN)
198
199
200     def daily_ftp(self):
201
202

```

```

203     files=glob.glob('*[0-9].CSV') #scelgo i file non elaborati (
senza "_done") e generati dal DataTaker
204     for file in files:
205         #file1=file[0:15]
206         fln=os.path.splitext(file) #creo tuple per avere il nome
del file e la sua estensione
207
208         # Elab.media(self, file, self.folder_BK, self.folder_CL)
209         Elab.media(self, file, self.folder_BK, self.folder_CL)
210
211         if flag==0:
212
213             os.chdir(self.folder_CL)
214
215             filename_CL="%s_%s_%s_mean%s" %((fln[0])[0:4], (fln
[0])[4:6], (fln[0])[6:8], fln[1])
216
217             if os.path.isfile(filename_CL):
218                 data_day=pd.read_csv(filename_CL)
219
220                 self.data=pd.concat([data_day, self.data], sort=
False)
221                 self.data.to_csv(filename_CL, index=False)
222
223             else:
224                 self.data.to_csv(filename_CL, index=False)
225
226
227
228         #os.remove(file)
229         os.chdir(self.folder_BK)
230         os.rename(file, "%s_done%s" %(fln[0], fln[1])) #
rinomino il file per capire che è stato elaborato
231
232         os.chdir(self.folder_CN)
233         self.Pout=(self.data.tail(1))[self.col]
234         np.savetxt(r'controllo.csv', self.Pout, fmt='%d')
235
236
237     def copia_ultima_riga (self, folder_copia):
238         os.chdir(folder_copia)
239         self.data_last=self.data.tail(1) #dataframe con solo l'ultima
riga
240         self.data_last.to_csv(" %s_last%s" %(self.fln[0], self.fln[1])
, index=False) #salva l'ultima stringa
241
242     def copia_valore (self, col):
243         self.Pout=(self.data.tail(1))[col]
244         np.savetxt(r'controllo.csv', self.Pout, fmt='%d')

```

```
245
246
247
248 class Controllo:
249     def __init__(self, folder, folder_state): #inizializza
250         self.folder=folder
251         os.chdir(self.folder)
252
253         self.folder_state=folder_state
254
255
256     def sch_control(self, filename, timestep):
257
258         os.chdir(self.folder_state)
259
260         with open(filename, "r", newline='') as f: #apro il file
e leggo le righe
261
262             data = list(csv.reader(f, delimiter=';'))
263
264             j=np.array(data)
265
266             #j = np.loadtxt(filename)
267
268             #j=self.Pout
269
270             sch_timestep=timestep
271
272             now=datetime.datetime.now() #current date and time
273
274             midn=datetime.datetime.now().replace(hour=0, minute=0,
second=0, microsecond=0) #current date at midnight
275
276             diff=now-midn #difference between now and midnight
277
278             sch_idx=int(diff.seconds/60/sch_timestep) #round up to
get the schedule index
279
280             sch_ctr=j[sch_idx,1]
281             # print(sch_ctr)
282
283             os.chdir(self.folder)
284             #self.T=str(self.T)
285             out_file = open("test.csv", "w")
286             out_file.write(str(sch_ctr))
287             out_file.close()
288
289
290
```

```

291 class Halio:
292     def __init__(self, folder, filename):
293
294         os.chdir(folder)
295         self.filename=filename
296         self.T = np.loadtxt(self.filename)
297         files = [f for f in os.listdir(folder)]# if f.endswith(".
estensione")
298         for file in files:
299             os.remove(file)
300
301
302
303     def comando_Halio (self):
304         key='OeqhesXCIsJvdiACD5gI4ZC4RjCn
305         dwqSabob8xOx7ZIy4bZH5Ld2dz7PXzjZvRGQ1
306         g7UW5WzXZ3HTbptHlx7H3uzb36dEO9UDRUsQi1
307         X7GcdvyVcyo0BGWq0sf6gQpMYz7EVvbDJOB6
308         z7jctFD8TUUNDjWwG7Ki5SIlnC1eEN3KA5lT
309         DsuevuDCPg3vUazBEhuDDZrOdVbDyBylUVR5
310         4yFdsEK8Qbir7nXPl1XPTVzCTx5x6j3abDkIPuqQYbKwR'
311         head={'x-api-key': key}
312
313         #Get all sites the key gives access to
314         url='https://api.halioglass.com/3/sites'
315         response=requests.request("GET",url,headers=head) #sometimes
it's needed to specify the proxy
316         siteID=response.json()[ 'results' ][0][ 'id' ]
317         #print(siteID)
318
319         ##Get all windows associated to a site
320         get_windows=url+'/' +siteID+' /windows'
321         response=requests.request("GET",get_windows,headers=head)
322         windows=response.json()[ 'results' ]#probabilmente va aggiunto
qualcosa
323
324         ##Loop through all windows
325         for idx,w in enumerate(windows): #better to create a group to
give the instruction instead of the for loop
326
327             window_name=(w[ 'name' ])
328             print(window_name)
329
330             windowID=(w[ 'id' ])
331
332             level=int(self.T)
333             print(level)
334             #level=20
335             post_tint=url+'/' +siteID+' /windows/' +windowID+' /tint '

```

```

336         payload={'level':level}
337         response=requests.request("POST",post_tint,headers=head,
json=payload)
338         check=response.json()['success']
339
340     def Halio_state(self, folder):
341
342         folder_phi = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT'
343         filename_angolo=r'angolo_solare.csv'
344
345         os.chdir(folder)
346         #print((glob.glob('*_mean.csv')))
347         filename=(glob.glob('*_mean.csv'))[-1]
348
349         self.data=(pd.read_csv(filename))
350
351         row=len(self.data)
352
353
354         # -----
355         time=(self.data['Timestamp'])[row-1]
356         tau_1=(self.data['T_EC1'])[row-1]
357         tau_2=(self.data['T_EC2'])[row-1]
358
359         folder_phi = r'C:\Users\Noemi Dipierro\Desktop\HALIO\DT'
360         filename_angolo = r'angolo_solare.csv'
361         os.chdir(folder_phi)
362         phi = pd.read_csv(filename_angolo)
363
364
365     def tau_phi(x):
366         x=mt.radians(x)
367         tau_cost=-0.002+2.813*np.cos(x)-2.341*(np.cos(x))
**2-0.05725*(np.cos(x))**3+0.599*(np.cos(x))**4
368         return(tau_cost)
369
370     datastep=" "+time[5:11]+" "+time[11:18]+"0"
371     rows,cols=phi.shape
372
373     for xx in range(0,rows):
374         if (phi['A'])[xx]==datastep:
375             phi_now=(phi['B'])[xx]
376             break
377
378         else:
379             phi_now=90
380
381     tau_cost=tau_phi(phi_now)
382     tau_01=tau_1/tau_cost

```

```

383     tau_02=tau_2/tau_cost
384
385     self.data.loc[row-1, 'T0_EC1'] = tau_01
386     self.data.loc[row-1, 'T0_EC2'] = tau_02
387
388
389     os.chdir(folder)
390     self.data.to_csv(filename, index=False)
391
392
393     def Hedio_level (self):
394         key='OeqhesXCIsJvdiACD5gI4ZC4Rj
395         CndwqSabob8xOx7ZIy4bZH5Ld2dz7P
396         XzjZvRGQ1g7UW5WzXZ3HTbptHlx7H3u
397         zb36dEO9UDRUsQi1X7GcdvyVcyo0BGWq0s
398         f6gQpMYz7EVvbDJOB6z7jctFD8TUUNDjW
399         G7Ki5SIlnC1eEN3KA5lTDsuevuDCPg3vUa
400         zBEhuDDZrOdVbDyBylUVR54yFdsEK8Qbi
401         r7nXP11XPTVzCTx5x6j3abDkIPuqQYbKwR'
402         head={'x-api-key': key}
403
404         #Get all sites the key gives access to
405         url='https://api.halioglass.com/3/sites'
406         response=requests.request("GET",url,headers=head) #sometimes
407         it's needed to specify the proxy
408         siteID=response.json()['results'][0]['id']
409         #print(siteID)
410
411         ##Get all windows associated to a site
412         get_windows=url+'/' +siteID+' /windows'
413         response=requests.request("GET",get_windows,headers=head)
414         windows=response.json()['results']#probabilmente va aggiunto
415         qualcosa
416         halio=pd.DataFrame(data={'targ': [0,0], 'curr':[-1,-1]})
417         current_lev=pd.DataFrame()
418
419         now = datetime.now() #(halio.loc[0, 'targ']!=halio.loc[0, '
420         curr']) and (halio.loc[1, 'targ']!=halio.loc[1, 'curr']):
421
422         ##Loop through all windows
423         for idx,w in enumerate(windows): #better to create a group to
424         give the instruction instead of the for loop
425
426         window_name=(w['name'])
427         windowID=(w['id'])
428
429         time.sleep(10)

```

```
427         check_tint=url+'/' +siteID+' /windows/' +windowID+' /live -
tint-data '#integer between 0 and 100 (9 tint levels)
428         response=requests.request("GET",check_tint,headers=head)
429
430         halio.loc[idx, 'targ']=(response.json()['results']['
targetLevel'])
431
432         halio.loc[idx, 'curr']=(response.json()['results']['level
'])
433
434
435     now = datetime.datetime.now()-now
436     return(now)
437
438
439     with open('text.csv', 'a+') as csvfile:
440         spamwriter = csv.writer(csvfile, delimiter=',')
441         timestr = datetime.datetime.now().strftime('%m/%d/%Y %H
:%M:%S')
442         spamwriter.writerow([timestr, 'Target level: '+str(
response.json()['results']['targetLevel']), 'Current level: '+str(
response.json()['results']['level'])])
```

## Codice per la creazione del grey-box ed identificazione parametri concentrati

```

1     %% Identification
2     clear all
3     close all
4     clc
5
6     odefun3 = 'testcell_model_TWINS_noAe';
7     time_step = 60; %time steps in an hour as defined in EnergyPlus (
8         actually, as will be in the resampled dataset)
9     %JtoW=3600; %conversion from kJ to kWh (1=deactivate, 3600=activate)
10
11    ts=1/time_step; % time step per iddata (in hours)
12
13    %%Parameters initial values – STEP 1
14    Ri = 25.95; %internal/external wall resistance [K/kW]
15    Ci = 0.040752973; %internal capacitance [kWh/K]
16    Ce = 0.23623; %wall capacitance [kWh/K]
17    Aw = 3.16; %window area [m^2]
18    Rv = 68.70664325; %Infiltration equivalent resistance [K/kW]
19
20    %%Building the system (initial grey-box)
21    parameters3 = {'Ri', Ri; 'Ci', Ci; 'Ce', Ce; 'Aw', Aw; 'Rv', Rv};
22    fcn_type = 'c';
23    sys3 = idgrey(odefun3, parameters3, fcn_type, 'TimeUnit', 'hours');
24
25    %% min and max boundaries for parameters
26    factorri=3;
27    factorci=2;
28    factorrv=3;
29    factoraw=1.5;
30    factorce=3;
31    sys3.Structure.Parameters(1).Minimum = Ri/factorri; %Ri
32    sys3.Structure.Parameters(1).Maximum = Ri*factorri; %Ri
33    sys3.Structure.Parameters(2).Minimum = Ci/factorci; %Ci
34    sys3.Structure.Parameters(2).Maximum = Ci*factorci; %Ci
35    sys3.Structure.Parameters(3).Minimum = Ce/factorce; %Ce
36    sys3.Structure.Parameters(3).Maximum = Ce*factorce; %Ce
37    sys3.Structure.Parameters(4).Minimum = Aw/factoraw; %Aw
38    sys3.Structure.Parameters(4).Maximum = Aw*factoraw; %Aw
39    sys3.Structure.Parameters(5).Minimum = Rv/factorrv; %Rv
40    sys3.Structure.Parameters(5).Maximum = Rv*factorrv; %Rv
41
42    %%
43    %y=temperatura interna
44    %u2,3,4=temperatura esterna(2), radiazione solare(3), potenza heater
45    (4)

```

```

44 %%
45
46 data=csvread('dataset_gennaio.csv'); %importing results from
    energyplus
47 data(:,3)=data(:,3)/1000; %/1000 to transform incident solar
    radiation * g-value (Qs) from W to kW
48 data(:,4)=data(:,4)/1000; %/1000 to transform heater electric power (
    Qh) from W to kW
49
50 data_rs = resample (data, 1, 60*ts, 0); % 1 data every x minutes, n=0
51
52 data1=iddata(data_rs(:,1),data_rs(:,[2;3;4]), ts, 'TimeUnit', 'hours'
    );%ts, not 1
53
54 st_day=0;
55 st_point=1+(st_day*time_step*24); %starting point for data estimation
    subset
56 data_est=data1(st_point:st_point+(2*7*time_step*24)-1); %data
    estimation subset
57 data_test=data1(st_point+(2*7*time_step*24):st_point+((3*7*time_step
    *24))-1); %data testing subset
58
59 %Identifying the system
60 X0=[data1.y(st_point);data1.y(st_point)-0.15];
61 % X0=[22.5;22.5];
62 opt = greyestOptions;
63
64 opt.DisturbanceModel='none';
65 opt.SearchMethod='auto';
66 opt.SearchOption.MaxIter=20;
67 % opt.OutputWeight='noise';
68 % opt.SearchOption.TolFun=1e-6;
69 opt.InitialState = X0;%X0
70 opt.Focus = 'simulation';
71 opt.EnforceStability = true;
72 opt.Display = 'on';
73
74 sys4 = greyest(data_est,sys3,opt);
75 [pvec4,pvec_sd4] = getpvec(sys4);
76
77 opt1 = compareOptions;
78 opt1.InitialCondition='e';
79
80 set(gcf,'position',[30,50,800,700])
81 compare(data_test,sys4,opt1);
82 legend('Simulated data','Model','Location','northeast','TextColor','
    black','NumColumns',2);
83
84 sys4.Structure.Parameters

```

```

85 pvec = getpvec(sys4);
86 %% Discrete
87 sys4s = idss (sys4);
88 discr_t=10; %discretization time (in minutes)
89 sys4d = c2d (sys4s , discr_t*ts);
90
91 data_rs_d = resample (data , 1, discr_t , 0); % 1 data every x minutes ,
      n=0
92
93 data1_d=iddata(data_rs_d(:,1),data_rs_d(:,[2;3;4]) , discr_t*ts , '
      TimeUnit', 'hours');%ts,not 1
94
95 % data_test_d=data1_d(1+(2*7*(time_step/discr_t)*24):1+((4*7*(
      time_step/discr_t)*24))-1); %data testing subset
96 data_test_d=data1_d((st_point+(2*7*time_step*24)-1)*(1/discr_t):(
      st_point+((3*7*time_step*24)-1)*(1/discr_t)));
97
98 % figure
99 % sim(sys4d , data_test , opt);
100 figure
101 compare(data_test_d , sys4d);

```

Codice per il controllo Rule Based *Rad 500* - EMS

```

1 CONTROL_RAD_500,      !- Name
2   IF (Minute == 60 || Minute == 15 || Minute == 30 || Minute == 45)
3     && occup>0 && fcloud<10, !- Program Line 1
4     IF INC <=150,      !- Program Line 2
5       SET EC1=HALIO73, !- A4
6       SET EC2=HALIO73, !- A5
7       SET g=0.468,     !- A6
8     ELSEIF INC<=250,  !- A7
9       SET EC1=HALIO54, !- A8
10      SET EC2=HALIO54, !- A9
11      SET g=0.229,     !- A10
12    ELSEIF INC<=350,  !- A11
13      SET EC1=HALIO23, !- A12
14      SET EC2=HALIO23, !- A13
15      SET g=0.116,     !- A14
16    ELSEIF INC<=500,  !- A15
17      SET EC1=HALIO14, !- A16
18      SET EC2=HALIO14, !- A17
19      SET g=0.102,     !- A18
20    ELSE,              !- A19
21      SET EC1=HALIO5,  !- A20
22      SET EC2=HALIO5,  !- A21
23      SET g=0.087,     !- A22
24    ENDIF,             !- A23
25    ENDIF,             !- A24
26    SET g_star=(0.468+g*1.07+g*1.09)/(1+1.07+1.09), !- A25
27    SET PHI_s=INC*g_prev, !- A26
28    SET Eglare= IncBeam*121.5*teta*0.671; !- A27

```

Codice per il controllo Rule Based *Rad 300* - EMS

```

1 CONTROL_RAD_300,      !- Name
2   IF (Minute == 60 || Minute == 15 || Minute == 30 || Minute == 45)
3     && occup>0 && fcloud<10, !- Program Line 1
4     IF INC <=50,      !- Program Line 2
5       SET EC1=HALIO73, !- A4
6       SET EC2=HALIO73, !- A5
7       SET g=0.468,    !- A6
8     ELSEIF INC<=100, !- A7
9       SET EC1=HALIO54, !- A8
10      SET EC2=HALIO54, !- A9
11      SET g=0.229,    !- A10
12    ELSEIF INC<=200, !- A11
13      SET EC1=HALIO23, !- A12
14      SET EC2=HALIO23, !- A13
15      SET g=0.116,   !- A14
16    ELSEIF INC<=300, !- A15
17      SET EC1=HALIO14, !- A16
18      SET EC2=HALIO14, !- A17
19      SET g=0.102,   !- A18
20    ELSE,            !- A19
21      SET EC1=HALIO5, !- A20
22      SET EC2=HALIO5, !- A21
23      SET g=0.087,   !- A22
24    ENDIF,          !- A23
25  ENDIF,            !- A24
26  SET g_star=(0.468+g*1.07+g*1.09)/(1+1.07+1.09), !- A25
27  SET PHI_s=INC*g_prev, !- A26
28  SET Eglare= IncBeam*121.5*teta*0.671; !- A27

```

Codice per il controllo Rule Based *Daylight* - EMS

```

1 CONTROL_DAYLIGHT,      !- Name
2   SET EC2= HALIO73,    !- Program Line 1
3   SET tau_vis_HALIO73=0.671, !- Program Line 2
4   SET tau_vis_HALIO54=0.478, !- A4
5   SET tau_vis_HALIO36=0.327, !- A5
6   SET tau_vis_HALIO23=0.2, !- A6
7   SET tau_vis_HALIO14=0.11,!- A7
8   SET tau_vis_HALIO5=0.02, !- A8
9   SET fc=44.62/180,    !- A9
10  SET LE=121.5,        !- A10
11  IF (Minute == 60 || Minute == 15 || Minute == 30 || Minute == 45)
12  && occup>0 && fcloud<10, !- A11
13  SET incidentanglerad=@ArcCos(teta), !- A12
14  SET sinteta=@Sin(incidentanglerad), !- A13
15  SET Ediffusa = Diffuse*LE*fc, !- A14
16  IF incidentanglerad<0.9456 && incidentanglerad>0.1974, !- A15
17  SET Ebeam= IncBeam*LE*sinteta, !- A16
18  SET Edaylight=Ebeam+Ediffusa, !- A17
19  IF Edaylight*tau_vis_HALIO73<=3000, !- A18
20  SET EC1= HALIO73,    !- A19
21  SET EC3= HALIO73,    !- A20
22  SET g=0.468,         !- A21
23  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO54<=3000, !- A22
24  SET EC1= HALIO54,    !- A23
25  SET EC3= HALIO54,    !- A24
26  SET g=0.229,         !- A25
27  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO36<=3000, !- A26
28  SET EC1= HALIO36,    !- A27
29  SET EC3= HALIO36,    !- A28
30  SET g=0.150,         !- A29
31  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO23<=3000, !- A30
32  SET EC1= HALIO23,    !- A31
33  SET EC3= HALIO23,    !- A32
34  SET g=0.116,         !- A33
35  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO14<=3000, !- A34
36  SET EC1= HALIO14,    !- A35
37  SET EC3= HALIO14,    !- A36
38  SET g=0.102,         !- A37
39  ELSE,                 !- A38
40  SET EC1= HALIO5,     !- A39
41  SET EC3= HALIO5,     !- A40
42  SET g=0.087,         !- A41
43  ENDIF,                !- A42
44  ELSE,                 !- A43
45  SET Edaylight=Ediffusa, !- A44
   SET EC1= HALIO73,    !- A45

```

```
46 SET EC3= HALIO73,          !- A46
47 SET g=0.468,              !- A47
48 ENDIF,                    !- A48
49 ENDIF,                    !- A49
50 SET g_star=(0.468+g*1.07+g*1.09)/(1+1.07+1.09), !- A50
51 SET PHI_s=INC*g_prev,     !- A51
52 SET Eglare= IncBeam*121.5*teta*0.671; !- A52
```

Codice per il controllo Rule Based *Glare* - EMS

```

1 CONTROL_GLARE,           !- Name
2   SET EC2= HALIO73,      !- Program Line 1
3   SET tau_vis_HALIO73=0.671, !- Program Line 2
4   SET tau_vis_HALIO54=0.478, !- A4
5   SET tau_vis_HALIO36=0.327, !- A5
6   SET tau_vis_HALIO23=0.2, !- A6
7   SET tau_vis_HALIO14=0.11,!- A7
8   SET tau_vis_HALIO5=0.02, !- A8
9   SET fc=44.62/180,      !- A9
10  SET LE=121.5,          !- A10
11  IF occup>0 && fcloud<10 && (Minute == 60 || Minute == 15 ||
Minute == 30 || Minute == 45), !- A11
12  SET incidentanglerad=@ArcCos(teta), !- A12
13  SET sinteta=@Sin(incidentanglerad), !- A13
14  SET Ediffusa = Diffuse*LE*fc, !- A14
15  SET Eglare= IncBeam*LE*teta, !- A15
16  IF incidentanglerad <0.9456 && incidentanglerad >0.1974, !- A16
17  IF Eglare*tau_vis_HALIO73<4000, !- A17
18  SET Ebeam= IncBeam*LE*sinteta, !- A18
19  SET Edaylight=Ebeam+Ediffusa, !- A19
20  IF Edaylight*tau_vis_HALIO73<=3000, !- A20
21  SET EC1= HALIO73,      !- A21
22  SET EC3= HALIO73,      !- A22
23  SET g=0.468,           !- A23
24  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO54<=3000, !- A24
25  SET EC1= HALIO54,      !- A25
26  SET EC3= HALIO54,      !- A26
27  SET g=0.229,           !- A27
28  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO36<=3000, !- A28
29  SET EC1= HALIO36,      !- A29
30  SET EC3= HALIO36,      !- A30
31  SET g=0.150,           !- A31
32  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO23<=3000, !- A32
33  SET EC1= HALIO23,      !- A33
34  SET EC3= HALIO23,      !- A34
35  SET g=0.116,           !- A35
36  ELSEIF Edaylight*tau_vis_HALIO14<=3000, !- A36
37  SET EC1= HALIO14,      !- A37
38  SET EC3 = HALIO14,     !- A38
39  SET g=0.102,           !- A39
40  ELSE,                   !- A40
41  SET EC1= HALIO5,        !- A41
42  SET EC3= HALIO5,        !- A42
43  SET g=0.087,           !- A43
44  ENDIF,                  !- A44
45  ELSE,                   !- A45

```

```
46 SET EC1= HALIO5,           !- A46
47 SET EC3= HALIO5,           !- A47
48 SET g=0.087,               !- A48
49 ENDIF,                     !- A49
50 ELSE,                      !- A50
51 SET Edaylight=Ediffusa ,   !- A51
52 SET EC1= HALIO73,          !- A52
53 SET EC3= HALIO73,          !- A53
54 SET g=0.468,               !- A54
55 ENDIF,                     !- A55
56 ENDIF,                     !- A56
57 SET g_star=(0.468+g*1.07+g*1.09)/(1+1.07+1.09) , !- A57
58 SET PHI_s=INC*g_prev;      !- A58
```

Codice per il controllo Rule Based *Temperature* - EMS

```

1 CONTROL_TEMP,           !- Name
2   SET Too=@Round(Tair),  !- Program Line 1
3   IF (Minute == 15 || Minute == 30 || Minute == 45 || Minute == 60)
4     && occup>0 && fcloud<10, !- Program Line 2
5     IF Too>=26,         !- A4
6       SET EC1=HALIO5,   !- A5
7       SET EC2=HALIO5,   !- A6
8       SET g=0.087,      !- A7
9     ELSEIF Too>24.5,    !- A8
10      SET EC1=HALIO14,   !- A9
11      SET EC2=HALIO14,   !- A10
12      SET g=0.102,      !- A11
13    ELSEIF Too>23,      !- A12
14      SET EC1=HALIO23,   !- A13
15      SET EC2=HALIO23,   !- A14
16      SET g=0.116,      !- A15
17    ELSEIF Too>21.5,    !- A16
18      SET EC1=HALIO36,   !- A17
19      SET EC2=HALIO36,   !- A18
20      SET g=0.150,      !- A19
21    ELSEIF Too>20,      !- A20
22      SET EC1=HALIO54,   !- A21
23      SET EC2=HALIO54,   !- A23
24    ELSE,               !- A24
25      SET EC1=HALIO73,   !- A25
26      SET EC2=HALIO73,   !- A26
27      SET g=0.468,      !- A27
28    ENDIF,             !- A28
29  ENDIF,               !- A29
30  SET g_star=(0.468+g*1.07+g*1.09)/(1+1.07+1.09), !- A30
31  SET PHI_s=INC*g_prev, !- A31
32  SET Eglare= IncBeam*121.5*teta*0.671; !- A32

```

**Codice per il controllo Predictive Rule-Based Control *Temperature* - Matlab**

```

1 clear all
2 close all
3 clc
4
5 % Initialize flags
6 retVal    = 0;
7 flaWri    = 0;
8 flaRea    = 0;
9 simTimWri = 0;
10 simTimRea = 0;
11 delTim    = 1*60; % time step (in min, as in the idf file)
12
13 % load grey-box model and variables
14 load('sys_gennaio.mat')
15
16 array=xlsread('temp_e_radsol.csv');
17 data=(1:1:length(array(:,1)));
18
19 % initiate output variables
20
21 outputs= [];
22 tmpc=[];
23 elapsed_time=[];
24
25
26 %BCVTB input - output
27 output = [0];
28 u = [0 20 20 0 0];
29
30 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
31 % Add path to BCVTB matlab libraries
32 %addpath( strcat(getenv('BCVTB_HOME'), '/lib/matlab'));
33 addpath('C:\Users\Noemi Dipierro\Documents\BCVTB\lib\matlab');
34 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
35 % Establish the socket connection
36 sockfd = establishClientSocket('socket.cfg');
37 if sockfd < 0
38     fprintf('Error: Failed to obtain socket file descriptor. sockfd=%d
39         .\n', ...
40             sockfd);
41     exit;
42 end
43 % Loop for simulation time steps.
44

```

```

45 i=6*24*363;
46 cont=0;
47 simulate=true;
48 while (simulate)
49     % Assign values to be exchanged.
50     try
51         [retVal, flaRea, simTimRea, u ] = ...
52             exchangeDoublesWithSocket(sockfd, flaWri, length(u),
53                                     simTimWri, ...
54                                     output);
55     catch ME1
56         % exchangeDoublesWithSocket had an error. Terminate the
57         connection
58         processError(ME1, sockfd, -1);
59         simulate=false;
60     end
61     % Check return flags
62     if (flaRea == 1) % End of simulation
63         disp('Matlab received end of simulation flag from BCVTB. Exit
64             simulation. ');
65         closeIPC(sockfd);
66         simulate=false;
67     end
68     if (retVal < 0) % Error during data exchange
69         exception = MException('BCVTB:RuntimeError', ...
70                                 'exchangeDoublesWithSocket returned value
71                                 %d', ...
72                                 retVal);
73         processError(exception, sockfd, -1);
74         simulate=false;
75     end
76     if (flaRea > 1) % BCVTB requests termination due to an error.
77         exception = MException('BCVTB:RuntimeError', ...
78                                 ['BCVTB requested MATLAB to terminate by
79                                 sending %d\n', ...
80                                 'Exit simulation.\n'], retVal);
81         processError(exception, sockfd, -1);
82         simulate=false;
83     end
84     % No flags have been found that require termination of the
85     % simulation.
86     if (simulate)
87         j=j+1;
88         simtime=u(1);

```

```

89 Text=u(2); % Site Outdoor Air Drybulb Temperature
90 Ti=u(3); % Zone Mean Air Temperature
91 gvalue=u(4); % g-value
92 % Phi_si=u(5); % Surface Outside Face Incident Solar Radiation
Rate per Area
93 Phihc=u(5)/1000; % Heating Power
94
95
96
97 tmst = 6; %timestep in an hour ogni 10min
98 hrz = 6*tmst; % horizon = x ore * timestep
99 ts=10;
100
101 if mod(simtime,60*(60/tmst))==0
102
103     i=i+1;
104     cont=cont+1;
105     a=2;
106     Tw=Ti-0.15; %Temperature wall (fittizia)
107
108     Tout=array(i:i+5,1); % Site Outdoor Air Drybulb Temperature
Foreward
109     Phi_s=array(i:i+5,2)/1000; % Surface Outside Face Incident
Solar Radiation Rate per Area Foreward
110
111     g_value(1:length(Tout))=gvalue;
112     Phi_hc(1:length(Tout))=Phihc;
113     PHI(:)=g_value(:).*Phi_s(:);
114     Tint(1:length(Tout))=Ti;
115
116     udata=iddata(Tint(:),[Tout(:),PHI(:),Phi_hc(:)],ts, 'TimeUnit',
'minutes');
117
118     opt = simOptions('InitialCondition',[Ti;Ti-0.15]);
119     [y,y_sd,x,x_sd]=sim(sys4d, udata, opt);
120
121
122
123     Ti_n=x(a,1);
124     Tw_n=x(a,2);
125     dTi=Ti_n-Ti;
126
127     if Ti<=20
128         if dTi>=0
129             if Ti_n>26
130                 output(1)=12;
131             elseif Ti_n>24.5
132                 output(1)=11;
133             elseif Ti_n>23

```

```

134         output(1)=10;
135     elseif Ti_n>21.5
136         output(1)=9;
137     elseif Ti_n>20
138         output(1)=8;
139     else
140         output(1)=7;
141     end
142 else
143     output(1)=7;
144 end
145 else
146     if dTi>=0
147         if Ti_n>26
148             output(1)=12;
149         elseif Ti_n>24.5
150             output(1)=11;
151         elseif Ti_n>23
152             output(1)=10;
153         elseif Ti_n>21.5
154             output(1)=9;
155         else
156             output(1)=8;
157         end
158     else
159         if Ti>26
160             output(1)=12;
161         elseif Ti>24.5
162             output(1)=11;
163         elseif Ti>23
164             output(1)=10;
165         elseif Ti>21.5
166             output(1)=9;
167         else
168             output(1)=8;
169         end
170     end
171 end
172
173
174 % Advance simulation time
175 simTimWri = simTimWri + delTim;
176
177 Ti_vett(cont)=Ti;
178 Ti_n_vett(cont)=Ti_n;
179 g_vett(cont)=output(1);
180 dTi_vett(cont)=dTi;
181
182

```

```
183 | end  
184 | end
```

Codice per il controllo Predictive Rule-Based Control *Total* - Matlab

```

1 clear all
2 close all
3 clc
4
5 % Initialize flags
6 retVal = 0;
7 flaWri = 0;
8 flaRea = 0;
9 simTimWri = 0;
10 simTimRea = 0;
11 delTim = 1*60; % time step (in min, as in the idf file)
12
13 % load grey-box model and variables
14 load('sys_gennaio.mat')
15
16 array=xlsread('temp_e_radsol.csv');
17 data=(1:1:length(array(:,1)));
18
19 % initiate output variables
20
21 outputs= [];
22 tmpc=[];
23 elapsed_time=[];
24
25
26 %BCVTB input - output
27 output = [0];
28 u = [0 20 20 0 0];
29
30 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
31 % Add path to BCVTB matlab libraries
32 %addpath( strcat(getenv('BCVTB_HOME'), '/lib/matlab'));
33 addpath('C:\Users\Noemi Dipierro\Documents\BCVTB\lib\matlab');
34 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
35 % Establish the socket connection
36 sockfd = establishClientSocket('socket.cfg');
37 if sockfd < 0
38     fprintf('Error: Failed to obtain socket file descriptor. sockfd=%d
39         .\n', ...
40             sockfd);
41     exit;
42 end
43 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44 % Loop for simulation time steps.
45 i=6*24*1;

```

```

46 cont=0;
47 simulate=true;
48 while (simulate)
49 % Assign values to be exchanged.
50     try
51         [retVal, flaRea, simTimRea, u ] = ...
52         exchangeDoublesWithSocket(sockfd, flaWri, length(u), simTimWri,
53         ...
54         output);
55     catch ME1
56         % exchangeDoublesWithSocket had an error. Terminate the
57         connection
58         processError(ME1, sockfd, -1);
59         simulate=false;
60     end
61 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
62 % Check return flags
63     if (flaRea == 1) % End of simulation
64         disp('Matlab received end of simulation flag from BCVTB. Exit
65         simulation. ');
66         closeIPC(sockfd);
67         simulate=false;
68     end
69
70     if (retVal < 0) % Error during data exchange
71         exception = MException('BCVTB:RuntimeError', ...
72         'exchangeDoublesWithSocket returned value %d', ...
73         retVal);
74         processError(exception, sockfd, -1);
75         simulate=false;
76     end
77
78     if (flaRea > 1) % BCVTB requests termination due to an error.
79         exception = MException('BCVTB:RuntimeError', ...
80         ['BCVTB requested MATLAB to terminate by sending %d\n', ...
81         'Exit simulation.\n'], retVal);
82         processError(exception, sockfd, -1);
83         simulate=false;
84     end
85 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
86 % No flags have been found that require termination of the
87 % simulation.
88     if (simulate)
89         j=j+1;
90
91         simtime=u(1);
92         Text=u(2); % Site Outdoor Air Drybulb Temperature
93         Ti=u(3); % Zone Mean Air Temperature
94         gvalue=u(4); % g-value

```

```

92     Phihc=u(5)/1000; % Heating Power
93
94
95
96     tmst = 6; %timestep in an hour ogni 10min
97     hrz = 6*tmst; % horizon = x ore * timestep
98     ts=10;
99
100    if mod(simtime,60*(60/tmst))==0
101
102        i=i+1;
103        cont=cont+1;
104        a=2;
105        Tw=Ti-0.15; %Temperature wall (fittizia)
106
107        Tout=array(i:i+5,1); % Site Outdoor Air Drybulb
Temperature Foreward
108        Phi_s=array(i:i+5,2)/1000; % Surface Outside Face
Incident Solar Radiation Rate per Area Foreward
109        cos_teta=array(:,3);
110        Diffusa=array(:,4)*121.5*44.62/180;
111        teta=acos(cos_teta);
112        sin_teta=sin(teta);
113
114        INC=array(:,2);
115        Eglare=INC.*121.5.*cos_teta;
116
117        g_value(1:length(Tout))=gvalue;
118        Phi_hc(1:length(Tout))=Phihc;
119        PHI(:)=g_value(:).*Phi_s(:);
120        Tint(1:length(Tout))=Ti;
121
122        udata=iddata(Tint(:),[Tout(:),PHI(:),Phi_hc(:)],ts, '
TimeUnit', 'minutes');
123
124        opt = simOptions('InitialCondition',[Ti;Ti-0.15]);
125        [y,y_sd,x,x_sd]=sim(sys4d, udata, opt);
126
127        Ti_n=x(a,1);
128        Tw_n=x(a,2);
129        dTi=Ti_n-Ti;
130
131
132        if (teta(i)<0.9456) && (teta(i)>0.1974)
133            if (Eglare(i)*0.671<4000) && Ti_n<=26
134                Ebeam=INC.*121.5.*sin_teta;
135                Edaylight=Ebeam+Diffusa;
136
137            if Ti_n>26

```

```

138         output(1)=12;
139     elseif Ti_n>24.5 && Edaylight(i)*0.11<3000
140         output(1)=11;
141     elseif Ti_n>23 && Edaylight(i)*0.2<3000
142         output(1)=10;
143     elseif Ti_n>21.5 && Edaylight(i)*0.327<3000
144         output(1)=9;
145     elseif Ti_n>20 && Edaylight(i)*0.478<3000
146         output(1)=8;
147     else
148         output(1)=7;
149     end
150 else
151     output(1)=12;
152 end
153 else
154     output(1)=7;
155 end
156 end
157
158 % Advance simulation time
159 simTimWri = simTimWri + delTim;
160
161 Ti_vett(cont)=Ti;
162 Ti_n_vett(cont)=Ti_n;
163 g_vett(cont)=output(1);
164 dTi_vett(cont)=dTi;
165 end
166 end

```

# Bibliography

- [1] European Commision. *Quadro 2030*. 2019. URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_it#:~:text=0biettivi%5C%20chiave%5C%20per%5C%20il%5C%202030,5%5C%25%5C%20dell'efficienza%5C%20energetica](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_it#:~:text=0biettivi%5C%20chiave%5C%20per%5C%20il%5C%202030,5%5C%25%5C%20dell'efficienza%5C%20energetica) (cit. on p. 1).
- [2] *Energy performance of buildings directive recast*. European Union, 2010 (cit. on p. 1).
- [3] *Energy performance of buildings directive*. European Union, 2018 (cit. on p. 1).
- [4] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, and Christine Pout. «A review on buildings energy consumption information». In: *Energy and buildings* 40.3 (2008), pp. 394–398 (cit. on p. 2).
- [5] Fabio Favoino, Mauro Overend, and Qian Jin. «The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies». In: (2015) (cit. on pp. 2, 97).
- [6] Rickard Tällberg, Bjørn Petter Jelle, Roel Loonen, Tao Gao, and Mohamed Hamdy. «Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies». In: *Solar energy materials and solar cells* 200 (2019) (cit. on pp. 2, 6, 7, 97).
- [7] Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi, and Seeram Ramakrishna. «A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment». In: *Solar energy materials and solar cells* 159 (2017) (cit. on pp. 5, 7, 8, 11).
- [8] Erdem Cuce and Saffa B Riffat. «A state-of-the-art review on innovative glazing technologies». In: *Renewable & sustainable energy reviews* 41 (2015), pp. 695–714 (cit. on pp. 7, 8).
- [9] Francesco Goia, Marco Perino, and Valentina Serra. «Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems». In: 60 (2013), pp. 442–452 (cit. on p. 8).

- [10] Xingming Wu, Jianming Zheng, and Chunye Xu. «A newly-designed self-powered electrochromic window». In: *Science China Chemistry* 60.1 (2017), pp. 84–89 (cit. on pp. 9, 11).
- [11] Claes G Granqvist, İlknur Bayrak Pehlivan, and Gunnar A Niklasson. «Electrochromics on a roll: Web-coating and lamination for smart windows». In: *Surface & coatings technology* 336 (2018), pp. 133–138 (cit. on pp. 9, 10).
- [12] Giovanni Gennaro. «Strategie di controllo avanzate di vetri elettrocromici per il risparmio energetico negli edifici: caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche». MA thesis. Politecnico di Torino, 2018/2019 (cit. on pp. 10, 28, 31, 43, 44).
- [13] Claes G Granqvist. «Recent progress in thermochromics and electrochromics: A brief survey». In: *Thin solid films* 614.PB (2016), pp. 90–96 (cit. on p. 11).
- [14] «A Vertically Integrated Solar-Powered Electrochromic Window for Energy Efficient Buildings». In: *Advanced Materials* 26.28 (2014), pp. 4895–4900 (cit. on pp. 11, 12).
- [15] Aritra Ghosh and Brian Norton. «Durability of switching behaviour after outdoor exposure for a suspended particle device switchable glazing». eng. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 163 (2017), pp. 178–184 (cit. on p. 11).
- [16] Guglielmo Macrelli. «Optical characterization of commercial large area liquid crystal devices». In: *Solar energy materials and solar cells* 39 (1995), pp. 123–131 (cit. on pp. 11, 12).
- [17] Aritra Ghosh, Brian Norton, and Aidan Duffy. «Effect of sky conditions on light transmission through a suspended particle device switchable glazing». eng. In: *Solar energy materials and solar cells* 160 (2017), pp. 134–140 (cit. on p. 12).
- [18] Yu Xia, Xiao Liang, Yun Jiang, Shaofu Wang, Yuyang Qi, Yumin Liu, Li Yu, Huai Yang, and Xing-Zhong Zhao. «High-Efficiency and Reliable Smart Photovoltaic Windows Enabled by Multiresponsive Liquid Crystal Composite Films and Semi-Transparent Perovskite Solar Cells». In: *Advanced Energy Materials* 33 (2019) (cit. on p. 12).
- [19] B.E. Treml and T. Hanrath. «Quantitative Framework for Evaluating Semi-transparent Photovoltaic Windows». In: *ACS Energy Letters* 2 (2016) (cit. on p. 12).
- [20] Jean-Michel Dussault, Maarten Sourbron, and Louis Gosselin. «Reduced energy consumption and enhanced comfort with smart windows: Comparison between quasi-optimal, predictive and rule-based control strategies». In: *Energy and buildings* (2016) (cit. on p. 13).

- [21] Niccolò Aste, Massimiliano Manfren, and Giorgia Marenzi. «Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis». eng. In: *Renewable & sustainable energy reviews* (2017) (cit. on pp. 13, 18).
- [22] Fabio Favoino, Francesco Fiorito, Alessandro Cannavale, Gianluca Ranzi, and Mauro Overend. «Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates». In: *Applied energy* (2016) (cit. on pp. 13, 20).
- [23] Szymon Firląg, Mehrangiz Yazdanian, Charlie Curcija, Christian Kohler, Simon Vidanovic, Robert Hart, and Stephen Czarnecki. «Control algorithms for dynamic windows for residential buildings». In: *Energy and buildings* (2015) (cit. on p. 14).
- [24] Jae Hoon Lee, Jinhwa Jeong, and Young Tae Chae. «Optimal control parameter for electrochromic glazing operation in commercial buildings under different climatic conditions». eng. In: *Applied energy* (2020) (cit. on p. 14).
- [25] Byung-Ki Jeon, Eui-Jong Kim, Younggy Shin, and Kyoung-Ho Lee. «Learning-Based Predictive Building Energy Model Using Weather Forecasts for Optimal Control of Domestic Energy Systems». In: *Sustainability (Basel, Switzerland)* 11.1 (2018), p. 147 (cit. on p. 15).
- [26] Frauke Oldewurtel, Alessandra Parisio, Colin N Jones, Dimitrios Gyalistras, Markus Gwerder, Vanessa Stauch, Beat Lehmann, and Manfred Morari. «Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control». In: 45 (2012), pp. 15–27 (cit. on pp. 16, 20).
- [27] Gianluca Serale, Massimo Fiorentini, Alfonso Capozzoli, Daniele Bernardini, and Alberto Bemporad. «Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities». In: (2018) (cit. on pp. 16–18).
- [28] Francesco Isaia. «Exploiting the potential of adaptive building components by means of innovative control strategies». MA thesis. Politecnico di Torino, Aprile 2020 (cit. on pp. 17, 31, 43, 44, 46).
- [29] Xiwang Li and Jin Wen. «Review of building energy modeling for control and operation». In: *Renewable & sustainable energy reviews* 37 (2014), pp. 517–537 (cit. on pp. 18, 19).
- [30] Aurélie Fouquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, and Arnaud Jay. «State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review». In: *Renewable & sustainable energy reviews* 23 (2013), pp. 272–288 (cit. on p. 19).

- [31] Peder Bacher and Henrik Madsen. «Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings». In: *Energy and buildings* 43.7 (2011), pp. 1511–1522 (cit. on p. 19).
- [32] Chen Chen, Jianhui Wang, Yeonsook Heo, and Shaline Kishore. «MPC-Based Appliance Scheduling for Residential Building Energy Management Controller». In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.3 (2013), pp. 1401–1410 (cit. on p. 20).
- [33] Jiří Cigler, Samuel Prívvara, Zdeněk Váňa, Eva Žáčková, and Lukáš Ferkl. «Optimization of Predicted Mean Vote index within Model Predictive Control framework: Computationally tractable solution». In: *Energy and buildings* 52 (2012), pp. 39–49 (cit. on p. 21).
- [34] M. Perino. «Lecture slides from the course Energy savings and comfort in buildings». Politecnico di Torino (cit. on p. 21).
- [35] Hui Shen and Athanasios Tzempelikos. «Daylight-linked synchronized shading operation using simplified model-based control». In: *Energy and buildings* 145 (2017). ISSN: 0378-7788 (cit. on pp. 21, 24, 25).
- [36] Jie Xiong and Athanasios Tzempelikos. «Model-based shading and lighting controls considering visual comfort and energy use». In: *Solar energy* 134 (2016), pp. 416–428 (cit. on p. 22).
- [37] Gyeong Yun, Doo Yong Park, and Kang Soo Kim. «Appropriate activation threshold of the external blind for visual comfort and lighting energy saving in different climate conditions». In: *Building and Environment* (2017). Advances in daylighting and visual comfort research. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.021>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316304450> (cit. on p. 23).
- [38] Angelina Katsifaraki, Bruno Bueno, and Tilmann E Kuhn. «A daylight optimized simulation-based shading controller for venetian blinds». In: *Building and environment* 126 (2017), pp. 207–220. ISSN: 0360-1323 (cit. on pp. 23, 58).
- [39] Line Karlsen, Per Heiselberg, and Ida Bryn. «Occupant satisfaction with two blind control strategies: Slats closed and slats in cut-off position». In: *Solar energy* 115 (2015). ISSN: 0038-092X (cit. on pp. 23, 24, 58).
- [40] *EnergyPlus™ Version 9.3.0 Documentation Engineering Reference*. U.S. Department of Energy, 2020 (cit. on pp. 26, 35).

- [41] *Building Controls Virtual Test Bed User Manual Version 1.6.0*. Simulation Research Group Building Technology and Urban Systems Department Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, 2016 (cit. on p. 27).
- [42] PERINO M, SERRA V, and ZANGHIRELLA F. «Experimental evaluation of a climate façade: energy efficiency and thermal comfort performance». In: , Junjie Liu, Tengfei Zhang, Zhiqiang (John) Zhai, 2008 (cit. on p. 28).
- [43] Donatella Pepe. «Controllo dinamico della radiazione solare con smart glazing per il comfort termico ambientale: caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche.» MA thesis. Politecnico di Torino, 2018/2019 (cit. on pp. 28, 31, 43, 44).
- [44] Francesco Goia and Valentina Serra. «Analysis of a non-calorimetric method for assessment of in-situ thermal transmittance and solar factor of glazed systems». In: *Solar energy* 166 (2018), pp. 458–471. ISSN: 0038-092X (cit. on p. 30).
- [45] *EN ISO 9869-1:2014 Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance Heat flow meter method*. European Union, 2014 (cit. on p. 31).
- [46] *Measurement of Energy and Demand Savings*. ASHRAE Guideline 14:2002, 2002 (cit. on p. 44).
- [47] *UNI EN 12381:2003 Heating systems in buildings - Method for calculation of the design heat load*. European Union, 2003 (cit. on p. 52).
- [48] Luigi Giovannini, Fabio Favoino, Valerio Roberto Maria Lo Verso, Valentina Serra, and Anna Pellegrino. «GLANCE (GLare ANnual Classes Evaluation): An approach for a simplified spatial glare evaluation». In: *Building and environment* 186 (2020) (cit. on pp. 58, 61, 66).
- [49] John Clauß, Sebastian Stinner, Igor Sartori, and Laurent Georges. «Predictive rule-based control to activate the energy flexibility of Norwegian residential buildings: Case of an air-source heat pump and direct electric heating». eng. In: *Applied energy* 237 (2019), pp. 500–518. ISSN: 0306-2619 (cit. on p. 63).
- [50] John Mardaljevic, Marilynne Andersen, Nicolas Roy, and Jens Christoffersen. *Daylighting, Artificial Lighting and Non-Visual Effects Study for a Residential Building*. eng (cit. on p. 66).
- [51] *Analisi critica per l'individuazione di correlazioni tra il Fattore di luce Diurna e le condizioni di cielo*. ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, 2015 (cit. on p. 66).

- [52] *EN 16798-1:2019 Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.* European Union, 13 Giugno 2019 (cit. on p. 66).
- [53] Federico Tartarini, Stefano Schiavon, Toby Cheung, and Tyler Hoyt. «CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations». eng. In: *SoftwareX* 12 (2020), p. 100563. ISSN: 2352-7110 (cit. on p. 67).
- [54] Alessandro Cannavale, Francesco Martellotta, Pierluigi Cossari, Giuseppe Gigli, and Ubaldo Ayr. «Energy savings due to building integration of innovative solid-state electrochromic devices». eng. In: *Applied energy* 225 (2018), pp. 975–985. ISSN: 0306-2619 (cit. on p. 97).



# Acknowledgements

Vorrei innanzitutto ringraziare il Prof. Alfonso Capozzoli, che oltre ad essere relatore di questa tesi è stato un mio docente universitario sin dalla triennale, grazie al quale ho deciso di intraprendere questo percorso nell'ambito degli aspetti energetici dell'edilizia.

Un grazie anche ai correlatori Dr. Fabio Favoino e Dr. Francesco Isaia per avermi seguita passo dopo passo sempre con disponibilità e grazie per tutti i consigli forniti durante il lavoro.

Ringrazio anche il tesista Fabio Cassinelli, con il quale, seppur per un breve periodo, ho condiviso una stanza in dipartimento, per tutti i momenti di smarrimento in cui mi ha fornito aiuto.

Un ringraziamento ai miei genitori per essermi sempre stati accanto, seppur molto distanti, in tutte le scelte fatte, dalla prima partenza per Torino fino a quella per Madrid. Per tutti i consigli e per tutte le chiamate fatte, anche nei momenti in cui avrei voluto solo riposarmi.

Grazie a mia sorella Cristina, per ricordarmi che non esiste solo il Politecnico di Torino al mondo, per avermi ascoltata nei momenti in cui ne avevo più bisogno e per esserci sempre nelle occasioni più importanti, come quelle della scelta degli abiti.

Grazie a nonna Liliana, nonno Vittorio per dimostrarmi sempre il loro affetto in tutti i modi a loro possibili, come i rosari prima degli esami, e per essere sempre orgogliosi di me.

Grazie a nonna Tina, che da quando sono a Torino, ogni volta che ne ha avuto l'occasione è salita sul primo aereo per venire a trovarmi e grazie per essere sempre disponibile per parlare al telefono. Un grazie anche a Mario perché ogni volta che parla mi fa scoprire sempre qualcosa di nuovo.

Grazie a Noemi e Camilla, per dimostrarmi che l'amicizia creata negli anni del liceo può durare anche dopo 10 anni e 1000 km di distanza.

Vorrei ringraziare il Quarto Piano della Sezione San Paolo, perché dopo tante abitazioni non mi sono mai sentita tanto a casa a Torino come da quando sono qui.

Un grazie in particolare anche al gruppo tisana "Pompadour", per aver regalato un po' di serenità nei momenti più difficili del 2020.

Grazie a Michela, per aver fatto turni in portineria fino alle 2 di notte solo per tenermi in compagnia e per avermi fatto scoprire l'amore per le piante e che anche io ho il pollice verde.

Grazie a Tommaso, per essere stato sempre una presenza costante, per avermi fatto capire che per passare gli esami bisognava studiare e per tutte le volte che ha cucinato la pasta con tonno, zucchine e pomodorini.

Grazie a Fabio e Martina, per aver reso più leggere le tante ore di lezione seguite insieme ed aver condiviso meravigliose pause pranzo nel cortile delle aule I e i tanti gelati mangiati durante il secondo anno.

Grazie a Vincenzo, per insegnarmi che l'amicizia non è sentirsi ogni giorno, ma inviarsi quotidianamente video per ridere insieme e far sapere che si pensa all'altro.

Vorrei ringraziare Davide perché è sempre presente, perché mi supporta qualsiasi cosa accada, mi sprona ogni giorno ad essere una persona migliore, e soprattutto mi sopporta sempre e comunque.

Infine un ringraziamento anche a me stessa, per aver tenuto duro ed essere riuscita ad arrivare fino a questo giorno senza mollare.

Grazie a tutti.