# POLITECNICO DI TORINO Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



# SIMULAZIONE PARAMETRICA E CONTROLLO DINAMICO DI UNA FACCIATA DOPPIA PELLE

Relatore:Prof. Vincenzo CorradoCorrelatore:Ing. Fabio FavoinoIng. Giovanni Gennaro

Candidato: Sebastiano Venosa

Anno accademico 2020/2021

### ABSTRACT

Il riscaldamento globale è sicuramente una delle problematiche che maggiormente preoccupa la comunità mondiale, in quanto potrebbe mettere a rischio la sua sopravvivenza e soprattutto quella del pianeta stesso. Il settore dell'edilizia è uno dei maggiori responsabili dei consumi energetici mondiali e dell'emissione nell'atmosfera di CO2. Per tale motivo, le nuove politiche energetiche sono orientate alla drastica riduzione di tali consumi. Da ciò è stato introdotto il concetto di edifici NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) ovvero un edificio che ha un'altissima prestazione energetica; il cui fabbisogno energetico, ovvero raffrescamento, riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria ventilazione e illuminazione, risulta molto basso o quasi nullo e coperto in misura significativa da energia derivante da fonti rinnovabili, prodotta in situ. Gli scopi principali per garantire uno sviluppo sostenibile del settore edilizio sono: lo sviluppo e la ricerca di fonti rinnovabili per compensare i consumi relativi agli edifici. I componenti vetrati hanno un ruolo fondamentale sul bilancio termico degli edifici.

L'obbiettivo principale del lavoro di tesi è lo studio del comportamento di un prototipo di una facciata a doppia pelle (DSF), dinamica e altamente flessibile, con lo scopo di definire dei parametri che permettano di verificare se gli standard di efficientamento energetico e di comfort termico e visivo siano rispettati all'interno dell'ambiente climatizzato.

Attraverso Energy Plus, software per la simulazione energetica, si è modellato la DSF utilizzando il componente "AirFlowWindow" e successivamente il modello è stato calibrato rispetto ai dati misurati attraverso diverse campagne sperimentali svolte nel laboratorio esterno del Politecnico di Torino (TWINS), nel quale è montato il prototipo della DSF.

Infine, il modello calibrato è stato utilizzato per il design e l'implementazione di due differenti strategie di controllo (di tipo Rule based e Model based) con lo scopo di garantire elevati standard di efficienza energetica e soprattutto di comfort indoor.

## **SOMMARIO**

ABSTRACT	II
INDICE DELLE FIGURE	V
INDICE DELLE TABELLE	VIII
NOMENCLATURA	IX
1. INTRODUZIONE	1
1.1. Obiettivi della tesi	2
2. STATO DELL'ARTE DSF	4
2 1 Double Skin Facade come nuova soluzione tecnologica	4
2 2 Caratteristiche tecniche	5
2.3. Classificazione	
2.4.Vantaggi e svantaggi della DSF	
2.5.Strategia di controllo	
2.6.Indicatori fondamentali della DSF	
2.6.1.Total Facade Heat transfer	
2.6.2.Useful Daylight Illuminance (UDI)	
2.6.3.Visual metric	
2.6.4.Fabbisogno di energia primaria	
3. METODOLOGIA E MODELLAZIONE	20
3.1 Costruzione del modello Energy Plus	
3.1.2 Software di simulazione: Energy Plus	
3.1.3 Sketch up e importazione su Energy Plus	
3.2 Impostazione Algoritmi Energy Plus	
3.3 Airflow Window	
3.3.1 Airflow Control	
3.3.2 Software Window 7.7	
3.3.3 Stratigrafia DSF	
3.4 Window Shading control	
3.5 Impianto di climatizzazione	
3.6 Impianto di illuminazione	
3.7 Output	
0.0. Oinvulations a superstrict Analisi subsut	20

3.9 Descrizione sistema sperimentale	40
4. CALIBRAZIONE	45
4.1 Acquisizione dei dati misurati	47
4.2 Modifica dei dati climatici	48
4.3 Primo step: calibrazione iniziale	49
4.3.1 Verifica file climatico	50
4.3.2 Trasmissione solare vetro interno equivalente	51
4.3.3 Trasmissione solare tenda	53
4.4 Secondo step: calibrazione Thermal Buffer free running	55
4.4.1 Primo parametro: Conducibilità del poliuretano	56
4.4.3 Secondo parametro: Tasso di ricambio orario	57
4.4.4 Considerazioni finali	58
4.5 Terzo step: calibrazione Thermal Buffer Setpoint	60
4.5.1 Primo parametro: Coefficiente di riflessione del vetro equivalente interno	61
4.5.2 Secondo parametro: Conducibilità del vetro equivalente interno	63
4.5.3Terzo parametro: Coefficiente di riflessione della tenda	64
4.5.4 Considerazioni finali	65
4.6 Quarto step: calibrazione Outdoor Air Curtain SetPoint	67
4.6.1Considerazioni finali	74
4.7 Quinto step: calibrazione Exhaust Air SetPoint	77
5. IMPLEMENTAZIONE DEL CONTROLLO	79
5.1 Modello Energy Plus di un ufficio	79
5.2 Correlazione lineare	80
5.3 Controlli di riferimento: Benchmark	83
5.4 Impostazione delle due strategie di controllo	84
5.4.1 Controllo 1: Rule based	84
5.4.1.1 Simulazione parametrica	85
5.4.1.2 Analisi degli output – parametri di prestazione	86
5.4.2 Controllo 2: Model Based	91
5.5 Considerazioni finali	92
6. CONCLUSIONI	99
7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	101

## **INDICE DELLE FIGURE**

Figura 1 - Metodologia	3
Figura 2 – Tipologie di configurazione con il criterio modalita di ventilazione	7
Figura 3 – Tipologie di configurazione con criterio partizione facciata	8
Figura 4 - Riepilogo configurazioni DSF	8
Figura 5 – schema illustrativo Gvalue [4]	12
Figura 6 – Schema illustrativo del Tvis [4]	12
Figura 7 - G value giorno significativo inverno	13
Figura 8 - G value giorno significativo primavera	14
Figura 9 - G-value giorno significativo estate	14
Figura 10 - G- value giorno significativo autunno	15
Figura 11 – Schema rappresentativo del Total facade heat transfer di una Double Skin Facade	
(DSF) [4]	17
Figura 12 – Double Skin Façade, cella TWINS	21
Figura 13-Particolare vetrocamera pelle esterna della DSF	23
Figura 14 – Schema funzionale Energy Plus	24
Figura 15 – Interfaccia Ep Launch	25
Figura 16 – Modello 3D	26
Figura 17 – Estensione Energy Plus Euclid	26
Figura 18 – Class Material	26
Figura 19 – Class Construction	27
Figura 20 – Class Building Surface	27
Figura 21 – Class Zone infiltration	27
Figura 22 – Airflow window con schermatura in mezzeria dell'intercapedine	29
Figura 23 – Class Airflow Control -Configurazione Exhaust Air	30
Figura 24 – Configurazione completa per un Airflow window	30
Figura 25- Stratigrafia singola pelle	31
Figura 26 – Parametri termici vetro equivalente	31
Figura 27 – Parametri ottici vetro equivalente	31
Figura 28 – Classe Window Material Glass	32
Figura 29 – Classe Fenestration Surface	32
Figura 30 – Esempi di posizionamento schermatura	33
Figura 31 – stratigrafia con e senza tenda	33
Figura 32 – Classe Shading Control	34
Figura 33 – Classe HVAC Template termostato	34
Figura 34 – Classe "HVAC Template Zone:Ideal Load Air System	35
Figura 35 - Classe Light	36
Figura 36 - Reference point	37
Figura 37 - Classe Daylighting Control	37
Figura 38 - File template parametro window	39
Figura 39 - File template parametro blind	39
Figura 40 termocoppie superficiali sulle due pelli(sinistra) – termocoppie e anemometri	
all'interno della cavita(destra)	41
Figura 41 Termoflussimetri all'interno della cavita (sinistra) – Piranometri (destra)	42
Figura 42 -termocoppie superficiali involucro opaco	42
Figura 43 - piranometro superficiale (sinistra) e anemometro(destra)	43
Figura 44 termocoppie temperatura interna (sinistra) - termocoppia superficale (destra)	44

Figura 45 – Confronto radiazione incidente SUD, reale e simulata - TB iniziale	50
Figura 46 – Confronto radiazione trasmessa- primo parametro -TB curt iniziale	51
Figura 47 – Confronto radiazione trasmessa- primo parametro -TB nocurt iniziale	52
Figura 48 - Confronto radiazione trasmessa- secondo parametro -TB curt iniziale	53
Figura 49 - Confronto radiazione trasmessa- finale -TB nocurt iniziale	54
Figura 50 Confronto radiazione trasmessa - finale -TB curt iniziale	54
Figura 51 – Confronto T Indoor - primo parametro -TB free running	56
Figura 52 – Confronto T wall - primo parametro -TB free running	56
Figura 53– Confronto T Indoor - secondo parametro -TB free running	57
Figura 54 – Confronto T wall - secondo parametro -TB free running	58
Figura 55– Confronto T Indoor – finale -TB free running	59
Figura 56 - – Confronto T wall – finale -TB free running	59
Figura 57 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -TB nocurt setpoint	61
Figura 58 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -TB curt setpoint	62
Figura 59 – Confronto T superficiale glass indoor - secondo parametro -TB curt setpoint	63
Figura 60 – Confronto T superficiale glass indoor - secondo parametro -TB no curt setpoint	63
Figura 61 – Confronto T superficiale glass indoor – terzo parametro -TB curt setpoint	64
Figura 62 - Confronto T superficiale glass indoor – finale -TB curt setpoint	65
Figura 63 - Confronto T superficiale glass indoor - finale -TB nocurt setpoint	66
Figura 64 - Grafico delle velocita	68
Figura 65 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC, meccanica nocurt	
setpoint	69
Figura 66 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC meccanica curt	
setpoint.	70
Figura 67 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC, naturale nocurt	
setpoint	70
Figura 68 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC naturale curt setpoi	int
	71
Figura 69– Confronto flusso convettivo- primo parametro -OAC meccanica nocurt setpoint	72
Figura 70– Confronto T superficiale glass indoor – combinazione coefficiente moltiplicativo e	
additivo - OAC naturale nocurt setpoint	
	73
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC, meccanica nocurt setpoint	73 75
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC meccanica curt setpoint	73 75 75
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint	73 75 75 76
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73– Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint	73 75 75 76 76
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73– Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -FA meccanica nocurt setpoint	73 75 75 76 76 78
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73– Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint	73 75 75 76 76 78 78
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73– Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 77 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint	73 75 75 76 76 78 78 80
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 – Confronto Velocita - regressione lineare OAC naturale CLIBT	73 75 75 76 76 78 78 80 81
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73– Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Grafico velocita- radiazione incidente Figura 78 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 79 – Confronto velocita - regressione lineare OAC mecc no CURT	73 75 76 76 78 78 80 81 81
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 79 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mecc no CURT Figura 80 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> </ul>
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 80 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT Figura 81 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> </ul>
<ul> <li>Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint</li> <li>Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint</li> <li>Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint</li> <li>Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint</li> <li>Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint</li> <li>Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint</li> <li>Figura 77 – Grafico velocita- radiazione incidente</li></ul>	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> <li>82</li> </ul>
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 – Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 80 – Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT Figura 81 – Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare CAC mec CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare CAC mec CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare CAC mec CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare CAC mec CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare CAC mec CURT	73 75 76 76 78 80 81 81 81 81 82 82
<ul> <li>Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint</li> <li>Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC meccanica curt setpoint</li> <li>Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint</li> <li>Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint</li> <li>Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica nocurt setpoint</li> <li>Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente</li></ul>	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>85</li> </ul>
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 80 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mecc no CURT Figura 81 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 82 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 83 - Confronto velocita - regressione lineare CURT Figura 84 - Strategia di controllo rule based Figura 85 - Obeat Ocoal CONF OAC	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>85</li> <li>87</li> </ul>
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 77 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica curt setpoint Figura 78 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 – Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 80 – Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT Figura 81 – Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 82 – Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 83 – Confronto velocita - regressione lineare EA mec CURT Figura 83 – Confronto velocita - regressione lineare EA mec CURT Figura 84 – Strategia di controllo rule based Figura 85 – Qheat_Qcool_CONF OAC Figura 86 – Schema finale Rule Rased	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>85</li> <li>87</li> <li>82</li> </ul>
<ul> <li>Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint</li> <li>Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint</li> <li>Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale nocurt setpoint</li> <li>Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint</li> <li>Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica nocurt setpoint</li> <li>Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica curt setpoint</li> <li>Figura 77 - Grafico velocita - radiazione incidente</li></ul>	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>85</li> <li>87</li> <li>88</li> <li>80</li> </ul>
Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica curt setpoint Figura 73 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale curt setpoint Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica nocurt setpoint Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -EA meccanica curt setpoint Figura 77 – Grafico velocita - radiazione incidente Figura 78 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT Figura 80 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT Figura 81 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 82 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT Figura 83 - Confronto velocita - regressione lineare EA mec CURT Figura 83 - Confronto velocita - regressione lineare EA mec CURT Figura 84 - Strategia di controllo rule based Figura 85 - Qheat_Qcool_CONF OAC Figura 87 - Qheat_Qcool_CONF SA Figura 87 - Qheat_Qcool_CONF SA	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>78</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>81</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>82</li> <li>85</li> <li>87</li> <li>88</li> <li>89</li> <li>90</li> </ul>

Figura 89 – FABBISOGNO confronto con i benchmark CONF OAC	. 92
Figura 90 - UDI Confronto Benchmark CONF. OAC	. 92
Figura 91 – Grafico della percentuale di utilizzo – OAC Rule Based	. 93
Figura 92 - Percentuale di utilizzo- OAC Model Based	. 94
	. 95
Figura 94 - UDI_Confronto Benchmark_CONF. SA	. 95
Figura 95- Grafico della percentuale di utilizzo - SA	. 96
Figura 96 - Grafico della percentuale di utilizzo - SA Model Based	. 97
Figura 97 - Confronto OAC – SA	. 97
Figura 98 - confronto UDI configurazioni OAC_SA	98

## **INDICE DELLE TABELLE**

Гаbella 1 — Riepilogo trasmittanza componenti opachi della cella	21
abella 2 – Stratigrafia dei muri perimetrali[6]	22
Fabella 3 - Stratigrafia del pavimento[6]	22
Fabella 4 - Stratigrafia del soffitto[6]	22
abella 5 – Parametri componente opaco [6]	23
abella 6 - Apporti interni	36
۲abella 7 - Riepilogo configurazioni	40
۲abella 8 - Valori limite indici di calibrazione ۲	46
rabella 9 – Riepilogo configurazioni	48
abella 10 – Riepilogo valori per ogni parametro TB inziale	50
abella 11 – Riepilogo valori per ogni parametro TB free running ۲ المعانية ۲۵۰۰ ۲۵۰۰ ۲۵۰۰ ۲۵۰۰	55
abella 12 - Indici di calibrazione finali – TB free running ۲۵ الته المانية ۲۵ الته ۲۵ الته ۲۵	58
abella 13 – Riepilogo valori per ogni parametro TB set point و	61
abella 14 - Indici di calibrazione finali – TB setpoint الله المانية المانية المانية المانية ا	65
Гabella 15 — Riepilogo valori per ogni parametro OAC set point	68
Fabella 16 - Indici di calibrazione finali – OAC setpoint	74
abella 17 - Indici di calibrazione finali – EA setpoint	77
Fabella 18 - Coefficienti della regressione lineare       8	83
Fabella 19 - Tabella riassuntiva dei coefficienti       8	85
abella 20 - Parametri ottimali per OAC ٤	87
abella 21 - parametri ottimali per SA	90

## NOMENCLATURA

DSF	Double Skin Facade
NZEB	Near Zero Energy Building
OAC	Outdoor Air Curtain
IAC	Indoor Air Curtain
EA	Exhaust Air
SA	Supply Air
TB	Thermal Buffer
Gvalue	Fattore solare
$\mathbf{Q}_{\mathrm{sol},\mathrm{sw}}$	Radiazione a onde corte trasmessa direttamente [W]
Q <sub>sol,LW</sub>	Radiazione a onde lunghe riemessa dal calore assorbito nel vetro [W]
Q <sub>conv</sub>	Scambio termico convettivo tra vetro e aria di zona [W]
Q <sub>inc</sub>	Radiazione solare incidente totale [W]
T <sub>sol</sub>	Coefficiente di trasmissione solare nel solare [%]
T <sub>vis</sub>	Coefficiente di trasmissione solare nel visibile [%]
Ke	Indice di selettività
3	Emissivity [%]
Q <sub>air</sub>	Guadagno di calore convettivo dovuto al flusso nella cavità [W]
Qvent	Extra energia per compensare l'energia spesa dall'impianto HVAC [W]
Cp	Calore specifico dell'aria [J/kg-K]
ΔT	Differenza di temperatura tra interno e flusso d'aria [°C]
ṁ	Portata massica del flusso d'aria [kg/s]
T <sub>in</sub>	Temperatura interna [°C]
$T_{gap}$	Temperatura all'interno della cavità [°C]
UDI	Useful Daylight Illuminance [%]
X <sub>mis</sub>	Valore di illuminamento nel punto di riferimento [lux]
X <sub>set</sub>	Valore di illuminamento setpoint [lux]
Q <sub>heat</sub>	Fabbisogno di energia per il riscaldamento [kWh]
Q <sub>cool</sub>	Fabbisogno di energia per il raffrescamento [kWh]
Q <sub>ill</sub>	Fabbisogno di energia per illuminazione [kWh]

Q <sub>ele,aux</sub>	Fabbisogno di energia richiesta dai dispositivi ausiliari [kWh]
COP <sub>heat</sub>	Coefficiente di prestazione per il riscaldamento
COP <sub>cool</sub>	Coefficiente di prestazione per il raffrescamento
U	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]
λ	Conducibilità termica [W/mK]
ρ	Densità [k/m³]
R	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]
$\alpha_{in}$	Coefficiente di assorbimento interno
α <sub>out</sub>	Coefficiente di assorbimento esterno
EMS	Energy Management System
EPW	Energy Plus Weather
IDF	Input Data Format
TARP	Thermal Analysis Research Program

**1 - INTRODUZIONE** 

### 1. INTRODUZIONE

Uno dei problemi attuali, in questa epoca storica, è sicuramente il riscaldamento globale, che mette a rischio la sopravvivenza della specie umana, ma anche del pianeta stesso. Per questo motivo, si stanno attuando delle politiche energetiche e di crescita economica legate alla sostenibilità, che permetteranno una drastica riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera.

Come afferma il ministro norvegese Gro Harlem Brundtland: «per sviluppo sostenibile si intende quello sviluppo che è in grado di soddisfare i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri.»

In particolare, come sostenuto nell'articolo [1], il settore dell'edilizia è uno dei maggiori responsabili dei consumi energetici al livello mondiali, con circa il 40% dell'energia totale consumata nell'Unione Europea. Essendo un settore in forte espansione, le misure delle politiche europee sono soprattutto legate a quest'ultimo. In primis si è partiti dalla produzione dei materiali da costruzione, con l'introduzione della Dichiarazione di Prestazione, nella quale vengono stabilite tutte le caratteristiche dei materiali. Inoltre, in Italia con il decreto legislativo 50/2016 all'art 34 "criteri di sostenibilità energetica e ambientale" è stato reso obbligatorio il rispetto dei CAM (Criteri Ambientali Minimi). Questi decreti hanno l'obbiettivo di ridurre l'energia utilizzata per la produzione dei materiali e la possibilità di riutilizzare gli stessi.

Per quanto riguarda, invece, la fase di costruzione e gestione dell'edificio la Direttiva Europea 2010/31/EU rappresenta la svolta per la progettazione degli edifici. Tale Direttiva ha introdotto il concetto di edifici NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) e ha previsto che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione pubblici e privati devono rispettare tale criterio.

Un edificio può essere definito NZEB se ha un'altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico (ovvero raffrescamento, riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria ventilazione e illuminazione), risulta molto basso o quasi nullo, e coperto in misura significativa da energia derivante da fonti rinnovabili prodotta in situ. In Italia questo criterio diventerà obbligatorio per tutti gli edifici di nuova costruzione.

Innanzitutto, un edifico NZEB deve garantire un isolamento ottimale a livello dell'involucro in modo tale da limitare le dispersioni termiche durante la stagione invernale o fenomeni di surriscaldamento durante la stagione estiva.

Inoltre, un edificio ad energia quasi zero deve sfruttare al meglio l'esposizione solare, attraverso uno studio dell'orientamento e della disposizione dei locali domestici, in modo tale da sfruttare

1

gli apporti solari, ed anche la ventilazione naturale per limitare i consumi legati al riscaldamento e al raffrescamento.

Risulta chiaro, dunque, che sono due gli scopi principali da raggiungere per garantire uno sviluppo sostenibile del settore edilizio: lo sviluppo e la ricerca di fonti rinnovabili per compensare i consumi relativi agli edifici da una parte , e lo sviluppo di tecnologie per l'efficientamento energetico dell'involucro dell'edificio ( quasi come un sistema passivo )dall'altra, in modo tale che si possano garantire elevate prestazione in termini di consumi, ma allo stesso modo un comfort ottimale nell'ambiente indoor.

I componenti vetrati hanno un ruolo fondamentale sul bilancio termico degli edifici. Da varie analisi [1] si è stimato che essi sono i responsabili del 40 % del fabbisogno energetico dell'edificio. Ciò è dovuto al fatto che al momento la maggior parte degli edifici è costituito da componenti vetrati statici, i quali nonostante abbiano elevate prestazioni energetiche, possono anche risultare inefficienti se le condizioni climatiche sono diverse da quelle considerate per determinare tali caratteristiche. Un serramento ideale dal punto di vista dell'efficienza energetica potrebbe essere un sistema vetrato che cambia le proprie caratteristiche in base alle differenti condizioni climatiche, ovvero che permetta di sfruttare al massimo la radiazione solare durante la stagione invernale, consentendo la riduzione dei consumi energetici. Invece, durante la stagione estiva, tali sistemi devono minimizzare gli apporti derivanti dalla radiazione solare, in modo tale da evitare fenomeni di surriscaldamento all'interno dell'ambiente indoor, che porterebbe ad una situazione di discomfort.

#### 1.1. Obiettivi della tesi

L'obbiettivo principale del lavoro di tesi riguarda lo studio del comportamento di un sistema vetrato, in particolare una facciata doppia pelle dinamica in tutte le sue configurazioni, cercando di definire dei parametri di prestazione che permettano di valutare l'efficienza energetica e il livello di comfort fisico e visivo all'interno dell'ambiente climatizzato. Successivamente, in base a tali parametri, si andranno a definire diverse strategie di controllo che permetteranno una certa dinamicità al sistema vetrato garantendo elevati standard di efficienza energetica e di comfort.

Come si evince in recenti articoli [2], la performance energetica di un sistema vetrato così innovativo è strettamente legata alle strategie di controllo, infatti, una errata strategia di controllo potrebbe portare ad un aumento del fabbisogno energetico dell'edificio.

2

Nel caso di studio si attueranno due strategie di controllo del tipo "rule based" e "model based". Nella prima vengono impostate delle regole di base riguardanti determinati parametri (la temperatura dell'ambiente interno o esterno o la radiazione solare trasmessa). A seconda che tali regole vengano rispettate, la DSF assumerà una determinata configurazione. Nella seconda strategia, invece, la scelta della configurazione ottimale dipenderà dai modelli di riferimento, in base a dei parametri prestazionali.

In conclusione, possiamo definire le seguenti fasi della tesi:

- Creazione del modello energetico dell'oggetto di studio
- Calibrazione del modello
- Analisi dei parametri di prestazione
- Implementazione delle strategie di controllo.



Figura 1 - Metodologia

### 2. STATO DELL'ARTE DSF

#### 2.1. Double Skin Facade come nuova soluzione tecnologica

La Double Skin Facade [2] si definisce come un sistema vetrato avente due vetri, chiamati pelli, all'interno delle quali c'è una cavità d'aria molto grande che può essere ventilata in modo naturale, meccanico o ventilazione garantita da ventilatori. A differenza di una finestra con triplo vetro, la DSF ha la possibilità di inserire all'interno della cavità dispositivi di schermatura o anche di controllare la ventilazione tramite delle bocchette mobili posizionate normalmente nella parte alta e nella parte inferiore del serramento.

Tale soluzione tecnologica risale a meta del diciannovesimo secolo e ha subito nel corso del tempo un'importante evoluzione.

Nel 1849 l'inventore Jean-Baptiste Jobard descrisse una prima versione di facciata doppia pelle caratterizzata da una ventilazione meccanica, enunciando che in questa cavità durante l'inverno sarebbe dovuta circolare dell'aria calda e in estate, invece, un flusso caldo, permettendo così di garantire un certo comfort all'interno della zona termica.

Nel 1903 Crespo e Hebert realizzarono la prima versione di doppia pelle in Germania con l'obbiettivo di massimizzare la luce del giorno negli uffici nelle stagioni più fredde.

Nei primi anni del Novecento furono realizzate altre tipologie di DSF con altre priorità rispetto al solo scopo di massimizzare la luce solare.

Le Courbusier utilizza un sistema che ha permesso di creare un filler di aria calda in un edificio costruito a Mosca, e un filler di aria fredda a Dakar garantendo al tempo stesso un'elevata ermeticità all'edificio. Ciò ha permesso di evitare delle dispersioni dovute all' infiltrazione ed evitare il problema dell'ingresso delle sostanze inquinanti all'interno dell'ambiente. Inoltre, tale soluzione ha permesso di garantire all'interno dell'ambiente una temperatura pari a 18 gradi.

Nel 1980 le facciate doppia pelle o le facciate vetrate, in generale, venivano utilizzate solo per scopi puramente estetici e ambientali, ne sono un esempio i grattacieli che presentavano queste facciate interamente vetrate.

Negli anni '90 a causa delle prime problematiche legate alla condizione climatiche del pianeta e l'influenza politica verso edifici più sostenibili, le facciate doppia pelle acquisiscono un nuovo scopo; ovvero un sistema tecnologico su cui agire per garantire un miglior benessere interno,

4

aumentare la luce naturale all'interno dell'ambiente, e più in generale diminuire il fabbisogno energetico dell'edificio.

Analizzando proprio questo aspetto, nell'articolo [2], si evidenzia come sia abbastanza inutile avere la stessa facciata su tutte le direzioni dell'edificio, perché esse avranno comportamenti diversi a seconda delle esposizioni. Infatti, una facciata rivolta a sud dovrebbe essere progettata per massimizzare gli apporti solari, per garantire una maggiore fruizione della luce solare e adatta all'installazione dei pannelli fotovoltaici e di doppi vetri, dove l'aria presente all'interno dell'intercapedine, riscaldandosi, fornisce un ulteriore apporto termico all'ambiente. Invece, una parete a nord dovrebbe essere progettata come la classica parete opaca con elevato isolamento termico, in modo tale da diminuire le dispersioni termiche. Per quanto riguarda le facciate ad est e ovest, devono essere trattate con attenzione perché nel caso in cui fossero vetrate si avrebbero fenomeni di abbagliamento o di surriscaldamento all'interno della zona termica, quindi devono essere progettate prevendendo l'installazione di schermature solari.

Al giorno d'oggi, questa soluzione tecnologica è utilizzata maggiormente per il settore terziario con ottimi risultati in termini di efficienza energetica. Però, in molti casi c'è stato bisogno di un impianto di climatizzazione ausiliario per compensare il surriscaldamento estivo, provocando così un consumo di energia maggiore dell'energia risparmiata nel periodo invernale.

Per quanto riguarda il settore residenziale, tale soluzione non è ancora stata implementata a sufficienza, soprattutto la tipologia di facciata con dispositivi di controllo automatico, in quanto si riscontrano diverse problematiche legate alle abitudini dell'utente finale, il quale è abituato ad una "gestione manuale "della ventilazione naturale. Ma soprattutto c'è un problema legato ai costi di installazione, che al momento risultano molto elevati, scoraggiando gli eventuali clienti a adottare soluzioni di questo genere.

#### 2.2. Caratteristiche tecniche

Si passa ad analizzare le varie componenti della facciata doppia pelle:

Doppia pelle: normalmente sono costituite entrambi da doppi vetri o da triplo vetro. Con una tipologia di ventilazione solamente esterna, si preferisce installare un doppio vetro per la pelle interna e il vetro singolo per la pelle esterna. Invece, se la ventilazione avviene con aria prelevata internamente si preferisce vetro doppio esternamente e vetro singolo per la pelle interna. Nella maggior parte dei casi in cui si hanno diverse tipologie di ventilazione entrambe le pelli sono costituite da doppi vetri.

5

- <u>Cavità</u>: la larghezza all'interno della doppia pelle può variare tra i 10 cm e i 2 m, a seconda della tipologia di facciata. Inoltre, in base alla larghezza variano le condizioni fisiche dell'aria all'interno della cavità e la manutenzione relativa. L'aria all'interno può essere ventilata naturalmente o meccanicamente.
- <u>Dispositivi di schermatura:</u> normalmente vengono installati all'interno della cavità, in modo tale che possano essere protetti dalle intemperie. Hanno il compito di evitare fenomeni di abbagliamento e di schermo solare soprattutto nella stagione estiva. La scelta della tipologia di schermatura da utilizzare dipende da molti fattori che possono essere: pannello del vetro (basso emissivo oppure no), larghezza della cavità, strategia di ventilazione, alto impatto della luce diurna
- <u>Bocchette di ventilazione:</u> permettono la ventilazione all'interno della cavità, vengono posizionate sia sulla pelle esterna che interna, sia nella parte superiore che inferiore, in modo tale da garantire varie strategie di ventilazione.

#### 2.3. Classificazione

È possibile classificare la Double Skin Facade attraverso tre criteri, che sono indipendenti tra loro e sono basati non solo sulle caratteristiche geometriche, ma anche sulle modalità di funzionamento:

- Tipo di ventilazione
- Modalità di ventilazione della cavità
- Partizione geometrica della facciata

Il primo criterio fa rifermento alle forze principali che portano alla creazione di un flusso all'interno della cavità presente tra le due pelli. Possiamo definire tre tipi di ventilazione: naturale, meccanica e ibrida.

La prima è caratterizzata dai moti convettivi che si vengono a generare all'interno della cavità, ossia quando l'aria si surriscalda, avendo minore densità rispetto all'aria fredda, tende a salire mentre l'aria fredda tende a scendere e per questo si genera un flusso. Un altro fattore che è importante per la ventilazione naturale è sicuramente la direzione e la velocita del vento, che può comportare un aumento o una diminuzione del flusso. Inoltre, da vari esperimenti si è notato che con la radiazione solare, questi moti vengono incrementati aumentando la velocita del flusso all'interno della cavità.

La seconda, invece, è supportata da impianti di ventilazione che immettono aria all'interno della cavità, generando un flusso che può essere ascendente o discendente. Tale soluzione permette di controllare sia la velocita del flusso all'interno della cavità che la temperatura del flusso. Infine, la terza tipologia è una combinazione tra la ventilazione naturale e la ventilazione meccanica, infatti, ci sono dei ventilatori che incrementano il flusso naturale presente all'interno della cavita.

La modalità di ventilazione all'interno della cavità, invece, riguarda l'origine e la destinazione del flusso. Tale criterio è indipendente dalla tipologia di ventilazione. A differenza del primo criterio, la DSF può adottare differenti modalità di ventilazione in vari momenti, a seconda delle condizioni climatiche al contorno. Questo, come vedremo in seguito, è possibile attraverso delle strategie di controllo e la modifica della configurazione delle bocchette presenti nella DSF. Possiamo definire 5 differenti modalità di ventilazione:

- <u>Air exhaust</u>: l'aria viene estratta dall'ambiente interno ed espulsa esternamente, questo permette appunto di rimuovere l'aria "esausta "dalla zona termica.
- <u>Indoor air curtain</u>: l'aria viene prelevata dall'interno dell'ambiente climatizzato e ritorna all'interno della stanza. Questo permette di eliminare calore all'interno della zona termica
- <u>Air supply</u>: l'aria viene presa dall'esterno e immessa in ambiente, questo permette di garantire un ricambio d'aria all'interno della zona termica
- <u>Outdoor air curtain</u>: in questa modalità, l'aria viene introdotta all'interno della cavità dall'esterno ed espulsa sempre verso l'esterno, come se fosse una tenda d'aria esterna
- <u>Thermal Buffer</u>: tale configurazione si distingue dalle altre in quanto, in quest'ultima non è presente ventilazione, infatti le bocchette sono chiuse creando "un'intercapedine d'aria" che funge anche da isolamento termico alla zona



Figura 2 – Tipologie di configurazione con il criterio modalita di ventilazione

Per quanto riguarda il terzo criterio, *la partizione della facciata* suddivide le DSF in base alla configurazione geometrica: doppia finestra, facciata suddivisa per piano (questo significa che ogni piano avrà la propria ventilazione), facciata doppia con corridoio, facciata "shaft box", facciata doppia multipiano, facciata doppia multipiano con lamelle modificabili in base all' angolazione.



Figura 3 – Tipologie di configurazione con criterio partizione facciata

Nello schema sottostante si può osservare uno schema riassuntivo della classificazione della DSF.



Figura 4 - Riepilogo configurazioni DSF

### 2.4. Vantaggi e svantaggi della DSF

La storia delle DSF [3] ha permesso di avere dei riscontri positivi e negativi relativi a questa soluzione tecnologica, anche in relazione alla località dove questa è stata costruita e in che modo sia stata creata.

I vantaggi sono:

- <u>Isolamento acustico</u>: si è notato che con la doppia pelle si può ottenere una riduzione notevole dell'inquinamento acustico proveniente dall'esterno. Per tale ragione, sarebbe molto utile come soluzione tecnologica per edifici adibiti al settore terziario
- <u>Isolamento termico:</u> qui è possibile fare varie valutazioni a seconda della stagione. In inverno l'aggiunta di una pelle e soprattutto la configurazione in thermal buffer in notturna, permette di creare un'intercapedine d'aria che aumenta la resistenza termica della facciata, diminuendo così le dispersioni. In estate tramite la ventilazione, soprattutto di notte, il calore può essere estratto dall'interno della zona termica, evitando così il surriscaldamento.
- <u>Risparmio di energia e minore impatto ambientale</u>
- <u>Migliore protezione per le schermature</u>: essendo posizionata all'interno della cavità è protetta contro le intemperie.
- <u>Riduzione degli effetti di pressione del vento</u>
- <u>Trasparenza:</u> con questa soluzione costruttiva è possibile garantire un certo livello di illuminamento all'interno dell'ambiente, ma lasciando invariate le prestazioni energetiche che potevano essere garantite da una facciata opaca, inoltre questo permette di sfruttare a pieno la luce solare, portando così ad una riduzione del fabbisogno elettrico per l'illuminazione dell'ambiente interno.
- <u>Ventilazione naturale:</u> è uno dei principali vantaggi della DSF, come già detto in precedenza, è che possono esserci differenti tipi di ventilazione a seconda della località e delle condizioni climatiche. Ciò permette di garantire un comfort interno, dovuto sia alla temperatura di ingresso dell'aria, sia alla qualità dell'aria introdotta, e una riduzione del consumo energetico.
- <u>Comfort termico</u>: rispetto al classico serramento, la DSF avendo una doppia pelle permette di avere una temperatura superficiale del vetro interno molto più alta, garantendo così un maggiore comfort.

Bassi valori di trasmittanza e del coefficiente di guadagno termico solare

Gli svantaggi della DSF:

- <u>Alti costi di costruzione:</u> Rispetto ad una facciata classica composta da un vetro camera, la realizzazione della DSF comporta elevati costi.
- <u>Protezione dal fuoco</u>: in questo caso specifico ci sono pareri discordanti in quanto molti ritengono che la DSF sia un'ottima soluzione perché offre delle vie di fuga per il fumo in caso di incendi, ma altri esperti ritengono che questo sia negativo in quanto essendo la facciata a tutta altezza, c'è il rischio che non faccia altro che propagare il fuoco in altre zone dell'edificio.
- <u>Riduzione dello spazio utile interno:</u> la larghezza della cavità, che può variare dai 20 cm ai 2 m, può inficiare sulla superficie utile dell'unita interna.
- <u>Elevati costi di manutenzione</u>
- <u>Problemi di surriscaldamento:</u> se progettata male, e soprattutto non coadiuvata da un sistema di controllo che posso gestire la schermatura, uno dei principali svantaggi che può presentare la DSF è sicuramente il surriscaldamento dell'ambiente interno, soprattutto durante la stagione estiva. Questo può portare all'utilizzo di impianti di climatizzazione, che di conseguenza fanno aumentare il consumo energetico dell'edificio.
- Problemi di trasmissione per le comunicazioni telefoniche

### 2.5. Strategia di controllo

La verità è che la DSF è un sistema che dipende fortemente dalle condizioni climatiche esterne (radiazione solare, temperatura esterna, ecc) e questo influisce sull'ambiente interno. Per questo motivo è importante in primis, la progettazione e la costruzione della DSF in base alla località in cui sarà installata. Ma successivamente, in una fase di gestione della DSF è importante definire una strategia di controllo, tale da renderla efficiente durante tutto l'anno, che permetta di utilizzare gli apporti solari durante l'inverno, e in estate, coadiuvata da un sistema HVAC (Heating Ventilation Air Cooling), di evitare problemi di surriscaldamento. Un'applicazione di successo si ottiene quando tutti gli attuatori della DSF (bocchette, dispositivi di schermatura, angolazione delle schermature, ventilatori se presenti all'interno della cavità) possono essere controllati e sincronizzati da un sistema di controllo integrato.

Le strategie di controllo dovrebbero seguire i seguenti principi [3]:

- Gli occupanti devono poter influenzare ogni componente della DSF, anche se questo normalmente comporta un maggior consumo energetico
- Si devono sfruttare al massimo le condizioni esterne prima di utilizzare il sistema meccanico
- Si deve garantire il comfort con minor energia possibile
- Durante il "non utilizzo" dell'edificio il sistema di controllo deve focalizzarsi al risparmio energetico
- Durante "l'utilizzo" dell'edificio deve focalizzarsi sul comfort degli occupanti

Per poter attuare tali strategie è importante definire i parametri fondamentali della DSF e utilizzare i benchmark, per capire quale sia la soluzione ottimale e più efficiente. Inoltre, è importante installare all'interno della DSF dei sensori che permettano al sistema di controllo di valutare le condizioni climatiche.

#### 2.6. Indicatori fondamentali della DSF

I parametri principali che caratterizzano un componente vetrato sono:

- La trasmittanza termica U [W/m<sup>2</sup>k] definita come la quantità di potenza termica per unità di superficie trasmessa dal componente in presenza di una differenza di temperatura pari ad un grado tra interno ed esterno
- Il fattore solare G definito dalla seguente formula:

$$gvalue = \frac{Qsol, sw + Qsol, lw + Q, conv}{Qinc}$$

Qsol,sw=Radiazioni solari trasmesse direttamente (short waves) Qsol,lw=Radiazione solare emessa successivamente l'assorbimento della luce solare Qconv= Scambio di calore tra vetro e zona termica Qinc= Radiazione solare incidente sulla facciata



Figura 5 – schema illustrativo Gvalue [4]

- Il coefficiente di trasmissione solare nel solare Tsol, definito come il rapporto tra la radiazione solare diretta e diffusa trasmessa dal componente e la radiazione solare incidente considerando tutto lo spettro solare;
- Il coefficiente di trasmissione solare nel visibile Tvis, definito come il rapporto tra la radiazione solare diretta e diffusa trasmessa dal componente e la radiazione solare incidente, considerando solo lo spettro del visibile;



Figura 6 – Schema illustrativo del Tvis [4]

- L'indice di selettività Ke, definito come il rapporto tra il coefficiente di trasmissione solare nel visibile Tvis e il fattore solare g; questo parametro indica la capacità del vetro di trasmettere un selezionato range dello spettro del visibile;
- L'emissività ε, definito come il rapporto tra l'energia irradiata dal vetro rispetto all'energia irradiata da un corpo nero alla stessa temperatura del vetro;

Mentre per caratterizzare le facciate convenzionali basta definire solamente i parametri appena introdotti [4], per la caratterizzazione delle DSF bisogna invece definire dei parametri aggiuntivi che tengano conto della loro dinamicità. Ad esempio, dall'analisi dei dati sperimentali si è notato che il valore del G-value non è un valore fisso – come nel caso di un serramento classico- ma è fortemente dipendente dalla configurazione assunta dalla facciata.

Nei grafici sottostanti è possibile notare la variazione del G-value. Si è scelta un giorno significativo per ogni stagione, in base al valore di temperatura esterna e di radiazione solare di riferimento definiti dalla normativa, in base alla stagione presa in esame.



Figura 7 - G value giorno significativo inverno



Gvalue spring

Figura 8 - G value giorno significativo primavera



Gvalue summer

Figura 9 - G-value giorno significativo estate



Gvalue autumn

Figura 10 - G- value giorno significativo autunno

Analizzando i grafici, ciò che si evince in modo chiaro è che il G-value diminuisce nelle configurazioni con la tenda rispetto a quelle senza, in tutti e quattro i grafici, dovuto al fatto che con la tenda si ha una riduzione del fattore di radiazione solare diretta trasmessa Q,sol,sw.

Gli indicatori aggiuntivi che bisogna considerare per la DSF, e che nel caso oggetto di studio vengono presi come riferimento per le strategie di controllo, sono tre:

- Total Facade Heat transfer
- Visual metric
- Useful Daylight Illuminance
- Fabbisogno di energia primaria

#### 2.6.1. Total Facade Heat transfer

Per la facciata doppia pelle, [4] oltre le quantità relativa alla radiazione solare e al flusso convettivo, bisogna considerare altri due parametri fisici:

- Qair: guadagno di calore convettivo dovuto al flusso all'interno della cavità
- Qvent: energia extra per compensare il calore fornito o sottratto dall'impianto HVAC a causa della differenza tra la temperatura del flusso immesso o estratto, e la temperatura interna. Questa è una quantità fittizia che non viene trasferita attraverso il componente in termini di calore ma è associata ad una perdita o guadagno di calore dovuto ad un trasferimento di massa. Questa quantità può essere calcolata come segue:

$$Qvent = \dot{m} * Cp * \Delta T [W]$$

Dove:

Cp=calore specifico dell'aria [J/kg\*K]

 $\Delta T$  = differenza di temperatura tra interno e flusso d'aria

m=portata massica del flusso

Definite queste due quantità, è possibile definire il parametro Total Facade Heat transfer come la somma delle seguenti grandezze:

Total facade heat transfer = 
$$Q_{sol,SW} + Q_{sol,LW} + Q_{conv} + Q_{air} + Q_{vent}$$
 [W]

È possibile notare che la DSF può avere cinque differenti configurazione a cui corrispondono 5 differenti Total Facade Heat transfer:

 <u>Indoor Air curtain</u>: la facciata è ventilata solamente attraverso l'aria interna senza venire a contatto con l'aria esterna, la Qvent è nulla perché non c'è uno scambio tra interno ed esterno

Total facade heat transfer = 
$$Q_{sol,SW} + Q_{sol,LW} + Q_{conv} + Q_{air} [W]$$

 <u>Outdoor Air curtain</u>: la facciata è ventilata solamente attraverso l'aria esterna senza venire a contatto con l'aria interna, la Qvent è nulla perché non c'è uno scambio tra interno ed esterno, Qair è nulla perché il flusso d'aria non influenza l'aria dell'ambiente interno.

### $\textit{Total facade heat transfer} = Q_{\textit{sol,SW}} + Q_{\textit{sol,LW}} + Q_{\textit{conv}} [W]$

 <u>Air exhaust</u>: in questo caso l'aria interna viene sottratta, quindi si perde il calore all'interno della zona termica.

### Total facade heat transfer = $Q_{sol.SW} + Q_{sol.LW} + Q_{conv} + Q_{vent}$ [W]

Dove, Qair = 0 poiché l'aria all'interno della cavita non interagisce con l'aria interna,  $Qvent = m^*Cp^*(Tin-Tgap)$ , dove Tin, è la temperatura interna, e Tgap la temperatura all'interno della cavità.

Air supply: viene immessa aria dall'esterno all'interno

 $\textit{Total facade heat transfer} = Q_{\textit{sol,SW}} + Q_{\textit{sol,LW}} + Q_{\textit{conv}} + Q_{\textit{air}} + Q_{\textit{vent}} \left[W\right]$ 

 $Qvent = m^*Cp^*(Tin-Tgap)$ , rappresenta l'energia spesa per portare la temperatura del flusso alla temperatura interna. Se la temperatura della cavita è più alta, Qvent sarà negativa e quindi l'impianto sottrarrà calore all'ambiente.

Thermal Buffer: non è presente ventilazione, dunque Qvent e Qair sono nulli



 $\textit{Total facade heat transfer} = Q_{\textit{sol,SW}} + Q_{\textit{sol,LW}} + Q_{\textit{conv}} [W]$ 

Figura 11 – Schema rappresentativo del Total facade heat transfer di una Double Skin Facade (DSF) [4]

2.6.2. Useful Daylight Illuminance (UDI)

Il parametro Useful Daylight Illuminance(UDI)<u>[5]</u>, è la percentuale di tempo durante il quale l'illuminamento misurato in punto di riferimento è compreso dentro soglie specifiche. È possibile definire quattro soglie:

- 0-100 UDI Fell short
- 100-300 UDI Supplementary

- 300-3000 UDI Autonomus
- >3000 UDI Exceeded

La prima soglia fa riferimento al caso in cui l'impianto di illuminazione funzionerà al 100% per avere un determinato illuminamento all'interno dell'ambiente.

Nel secondo caso, invece, è presente la luce diurna, ma non è sufficiente a garantire l'illuminamento di setpoint, quindi l'impianto fornisce una percentuale di energia tale da raggiungerlo.

Nel terzo caso la luce diurna è sufficiente a garantire il setpoint e l'impianto non è acceso.

Nel quarto caso, la luce diurna eccede un valore soglia che indica presenza di discomfort visivo, dovuto al fenomeno di abbagliamento. In questo caso si dovrebbe agire con delle schermature.

#### 2.6.3. Visual metric

Tale metrica può essere ritenuta un parametro di comfort indoor in quanto permette di valutare l'illuminamento all'interno dell'ambiente riscaldato. È un coefficiente calcolato come segue:

**Visual metric**: 
$$\frac{X_{mis} - X_{set}}{X_{set}}$$

Dove

 $X_{mis}$  = rappresenta il valore misurato dell'illuminamento in un punto specifico all'interno dell'ambiente [lux]

 $X_{set} = \dot{e}$  un valore dell'illuminamento prefissato in partenza dall'utente [lux]

Attraverso questo coefficiente, e in base al valore che assume, è possibile capire se l'illuminazione naturale all'interno dell'ambiente è accettabile, o se c'è bisogno di un'integrazione attraverso l'impianto di illuminazione artificiale, o se c'è, oltre un valore soglia, il rischio di abbagliamento all'interno dell'ambiente. Dunque, tale parametro diventa importante per l'analisi delle diverse strategie di controllo, in quanto è possibile stabilire lo stato della schermatura solare (abbassata/alzata).

#### 2.6.4. Fabbisogno di energia primaria

Quest'ultimo parametro permette di valutare l'efficienza della DSF e analizzarne i consumi. Per poter determinare tale parametro bisogna determinare i consumi relativi al periodo di riscaldamento, al periodo di raffrescamento e quelli elettrici. Successivamente i primi due termini sono stati divisi per il coefficiente di prestazione relativo.

È calcolato come segue:

$$Fabb.\,en.\,primaria = \left(\frac{Q_{heat}}{COP_{heat}} + \frac{Q_{cool}}{COP_{cool}} + Q_{ill} + Q_{ele,aux}\right) * fatt.\,di\,conversione\,[Kwh]$$

Dove Q ele,aux è l'energia elettrica richiesta dai dispositivi ausiliari del sottosistema di emissione e di distribuzione. Il fattore di conversione permette di passare dal fabbisogno di energia elettrica, al fabbisogno di energia primaria. Questo fattore varia a seconda del paese e dipende dalla produzione di energia tramite fonti rinnovabili, oppure tramite fonti non rinnovabili. In Italia tale fattore è pari a 2,42.

## **3. METODOLOGIA E MODELLAZIONE**

In questo capitolo vengono affrontate nel dettaglio tutti i passaggi relativi alla modellazione del caso in esame, della caratterizzazione dei suoi componenti e della metodologia utilizzata, ossia la simulazione dinamica. Inoltre, verrà decritto il sistema sperimentale, che permetterà di passare allo step successivo della tesi.

### 3.1 Costruzione del modello Energy Plus

Modellare e simulare il comportamento di una DSF risulta abbastanza complesso, soprattutto perché manca un software di simulazione che permette di gestire gli aspetti dinamici di tali componenti. Per il caso di studio, si è appunto deciso di utilizzare il software Energy Plus per la parte della modellazione e per la valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio, invece MATLAB per il controllo dinamico della DSF.

### 3.1.1 Caratterizzazione della cella TWINS

Il caso oggetto di studio è la DSF installata nella cella TWINS (Testing Window Innovative System), situata sul tetto del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino. La cella ha dimensione interne 1,6m x 3,5m x 3m, tali dimensioni non sono casuali in quanto sono ispirate alle dimensioni delle facciate utilizzate per edifici del settore terziario, come gli uffici. È costituita interamente da componenti opachi, tranne la facciata esposta a Sud sulla quale è installata, la Double Skin Facade, oggetto di studio, e si trova in condizioni di non ombreggiamento da elementi esterni ed è presente una porta per accedere alla cella nella parte Nord. Inoltre, la cella è montata su una struttura metallica che la solleva da terra di 14 cm.



Figura 12 – Double Skin Façade,cella TWINS

Il soffitto e le pareti della cella sono formati da pannelli sandwich di 48 mm, con doppia lamiera in acciaio e poliuretano espanso, mentre il pavimento è stato aggiunto uno strato di linoleum al pannello sandwich.

Per la valutazione delle caratteristiche termiche dei componenti opachi della TWINS è stato preso in considerazione il lavoro svolto nella tesi [6], in cui è stata effettuata la caratterizzazione sperimentale dei componenti opachi nella stessa cella di prova. Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

Componente	U [W/M²K]		
орасо			
Parete Ovest	0.42		
Parete Est	0.48		
Parete Nord	0.48		
Soffitto	0.49		
Pavimento	0.7		

Tabella 1 – Riepilogo trasmittanza componenti opachi della cella

Inoltre, è stato possibile importare le stratigrafie dei componenti opachi con tutte le loro caratteristiche:

N	Materiale	Spessore [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/kgK]
Interno				0.13		
1	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
2	Poliuretano espanso	0.046	0.024	1.92	50	1250
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno				0.04		
COMPONENTI OPACO			s[m]	U [W/m2K]	α <sub>in</sub>	$\alpha_{out}$
muri perimetrali			0.048	0.48	0.5	0.5

Tabella 2 – Stratigrafia dei muri perimetrali[6]

N	Materiale	Spessore [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³ ]	c [J/kgK]
Interno				0.17		
1	Linoleum	0.005	0.11	4.55E-02	1900	1300
2	Poliuretano espanso	0.04	0.035	1.92	500	2000
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno				0.04		
COMPONENTI OPACO			s[m]	U [W/m2K]	α <sub>in</sub>	$\alpha_{out}$
pavimento		0.055	0.7	0.2	0.7	

Tabella 3 - Stratigrafia del pavimento[6]

N	Materiale	Spessore [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/kgK]
Interno				0.1		
1	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
2	Poliuretano espanso	0.04	0.024	1.92	50	1250
3	Acciaio	0.001	52	1.92E-05	7800	500
Esterno	sterno			0.04		
<b>COMPONENTI OPACO</b>			s[m]	U [W/m2K]	αin	$\alpha_{out}$
soffitto		0.048	0.48	0.5	0.7	

Tabella 4 - Stratigrafia del soffitto[6]

COMPONENTI OPACO	s[m]	U [W/m2K]	α <sub>in</sub>	$\alpha_{out}$					
porta	0.048	0.53	0.5	0.5					
Tabella E Darametri componente enace [6]									

Tabella 5 – Parametri componente opaco [6]

#### Componente vetrato

La facciata a sud è l'unica vetrata. La DSF è costituita da una doppia pelle, entrambi vetrocamera basso emissivi. In particolare, ogni pelle è costituita:

- Clearlite\_33\_2 spessore 6,5 mm
- Air 10%/Argon 90% spessore 16mm
- iTop 33 2 spessore 6,5mm



Figura 13-Particolare vetrocamera pelle esterna della DSF

Per quanto riguarda il telaio del DSF è costituito da alluminio per entrambi le pelli, anche la parte delle bocchette è costituita in alluminio.

#### 3.1.2 Software di simulazione: Energy Plus

Energy Plus [7] è un software sviluppato dal Dipartimento dell'energia degli USA per la simulazione energetica di un edificio. Oltre all'energia richiesta dall'edificio, il programma è usato per il calcolo dei carichi termici, per la modellazione degli impianti HVAC, per la verifica di comfort termico. Infatti, Energy plus non è altro che un insieme di moduli di programmi che lavorano insieme per il calcolo dell'energia richiesta dall'edificio in condizione climatiche diverse. Il nucleo centrale della simulazione è il modello dell'edificio basato sui principi fondamentali delle leggi della termofisica.



Figura 14 – Schema funzionale Energy Plus

È importante inserire su Energy Plus tutte le caratteristiche dei componenti d'involucro, dell'impianto e i dati relativi alla località scelta e alle condizioni climatiche esterne, quest'ultime implementate tramite un file climatico standard epw.

Per quanto riguarda le caratteristiche relative all'involucro e all'impianto, possono essere inserite nell'editor di testo in formato .txt oppure tramite l'editor dedicato in formato .idf, che è costituito da una serie di classi in cui successivamente si vanno a definire degli object con tutti i dati necessari. Energy plus è il software più utilizzato per la simulazione dinamica, grazie all'introduzione del linguaggio Energy Plus Runtime (ERL) che permette di implementare l'Energy Management System (EMS).

Nella figura sottostante è possibile vedere l'interfaccia di Energy plus in cui si distinguono tre macro-fasi:

- Input File
- Weather File
- Output File

ersVASUS\Desktop\Seb\Politecnico_d_Torino\texi\PROGETTO\timulazione_annusle\twinz_DSF_te 💌 ersVASUS\Desktop\Seb\Politecnico_d_Torino\texi\PROGETTO\timulazione_annusle\twinz_DSF_te 💌 Edk - Text Editor	IDF FILE
er File er VASUS/Derkitsp/Sebi/Polifecnico_d_Taino/Jeu/PROGETTO/Jerzo step_ems/VTA_Taino 160590_	EPW FIL
wie	
esults	
evel Tables Enors DEIN ELOMP END Bunt Cov Bunt CSV Meters RDD DE OUT PFDMP DBG Bunt CDD Valubles MDD MAP Screen SLN Sum Audit Table XML	OUTPUT
Heads         OE IN         ELOMP         BNO         Bunt Out         Bunt CSV           Meters         RDD         DE OUT         DFDMP         OBG         Bunt         EDD           Valubles         MDD         MAP         Screen         SLN         Bunt Aude         Table: SML           EIO         MTD         SPROF         SHD         ESO         Slab         Slab           SVG         ZSZ         EPMOF         VINL         MTR         Slab         Slab	Ουτρυτ

Figura 15 — Interfaccia Ep Launch

Nonostante le sue potenzialità, Energy plus è un programma di simulazione senza un'interfaccia grafica "user friendly". Infatti, esso si avvicina più ad un programma di linguaggio informatico rispetto ai classici programmi di modellazione 3D. Per questo motivo si avvale di altri programmi per la realizzazione dei modelli 3D che permettono di definire le geometrie del modello. I programmi più utilizzati sono due:

- Design Builder
- Sketchup

#### 3.1.3 Sketch up e importazione su Energy Plus

Il primo passo è stato creare il modello 3d della cella sul software SketchUp.

Però prima di iniziare a modellare è stato necessario installare su quest'ultimo un Plug-in di Energy Plus, Euclid Extension, che permette di rendere compatibili Energy Plus con il software di modellazione consentendo di esportare il modello in un file IDF. Inoltre, attraverso questa estensione, è stato possibile definire all'interno di SketchUp le varie zone termiche (in questo caso solo una), di rinominare le facciate e indicarne la tipologia, in modo tale da poter essere riconosciute all'interno del file IDF.



Figura 16 – Modello 3D

	Euclid	Rende	ering											8	
	Ø	Ŵ	-		•	0		<b>M</b>	₩	M	•	►	₩	M	
Euclid															
-				190	# 0		1 12	-	100	10	4		4	a	6

Figura 17 – Estensione Energy Plus Euclid

Definito il modello 3D e creato il file IDF, si è passati ad interfacciarsi con Energy Plus. Si è andati a definire la localizzazione della cella, inserendo la città e le coordinate geografiche, e sono stati inseriti i materiali che costituiscono l'involucro opaco e trasparenti e le schermature presenti, assegnando quindi le caratteristiche termiche ricavate dai dati sperimentali o da scheda tecnica.

IOOO91 Material		explanation of op	por ana canone noia					_
[0001]         Material:NoMass           [0002]         WindowMaterial:Glazing           [0002]         WindowMaterial:Gas           [0001]         WindowMaterial:GasMixture           [0001]         WindowMaterial:Shade           [0001]         WindowMaterial:Blind           [0001]         Construction	v	Dbject Description: Regular materials described with full set of thermal properties Field Description: ID: A1 Enter a alphanumeric value This field is required.						
Field	Units	Obj1	Obj2	Оыз	Obj4	Obj5	Obj6	0
Name		Steel ext	Expanded Poly	Linoleum	Steel_Door	Expanded poly_DO	Steel int	S
Roughness		Smooth	VeryRough	Rough	Smooth	VeryRough	Smooth	S
Thickness	m	0.001	0.046	0.005	0.006	0.036	0.001	0
Conductivity	W/m-K	52	0.024	0.11	52	0.02	52	5
Density	kg/m3	7800	50	1900	7800	30	7800	7
Specific Heat	J/kg-K	500	1250	1300	500	1600	500	5
Thermal Absorptance								
Solar Absorptance		0.7		0.2	0.5		0.5	
Visible Absorptance		0.7		0.2	0.5		0.5	

Figura 18 – Class Material

Successivamente, sono stati definite le stratigrafie dei vari componenti, nella classe Construction. Ciascun object della classe Construction è stato poi assegnato alla superficie corrispondente nella classe *"BuildingSurface:Detailes"*. Questa classe, insieme alle classi *"GlobalGeometryRules"* e *"Zone"* erano state già definite nel modello di SketchUp.
10007) Construction (0001) GlobaGeometryRules (0001) Zone (0006) BuildingSurface:Detailed (0001) FenestrationSurface:Detailed	Ţ	Field Description: ID: A1 Enter a alphanumeric v	i for each layer alue					
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	-
Name		Exterior floor	Exterior Wall	Exterior Roof	FRAME_SOUTH	DOOR	Double_skin_faca	ас
Outside Layer		Steel floor	Steel int	Steel ext	alluminio	Steel_DOOR	clearlite_33.2	
Layer 2		Expanded Poly floor	Expanded Poly	Expanded Poly		Expanded poly_DOI	Gap_9_W_0_016	iC
Layer 3		Linoleum	Steel int	Steel int		Steel_DOOR	itop plus_33.2	
Layer 4							Air cavity 12 cm	
Layer 5							Roller shade	
Layer 6							Air cavity 12 cm	
Layer 7							glass semplified	1
Layer 8								
Laver 9								
<							>	

Figura 19 – Class Construction

Field	Units	Obj1	Obj2	ОЫЗ	Obj4	Obj5	Obj6
Name		FLOOR	WEST WALL	NORTH WALL	EAST WALL	SOUTH WALL	ROOF
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof
Construction Name		Exterior floor	Exterior Wall	Exterior Wall	Exterior Wall	FRAME_SOUTH	Exterior Roof
Zone Name		zona termica 1					
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground							
Number of Vertices		4					

Figura 20 – Class Building Surface

Inoltre, seguendo le analisi effettuate nella tesi [6] è stato possibile definire anche il valore dell'infiltrazione presente nella cella. Come vedremo in seguito tale parametro sarà oggetto di verifica e validato.

Field	Units	Obj1
Name	24	BLOWER
Zone or ZoneList Name	2	zona termica 1
Schedule Name	14	ALWAYS 1
Design Flow Rate Calculation Method	22	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s	
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	100 C
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	1997 - 19
Air Changes per Hour	1/hr	1.5
Constant Term Coefficient	2	1
Temperature Term Coefficient	6. 	1
Velocity Term Coefficient	8	8

Figura 21 – Class Zone infiltration

# 3.2 Impostazione Algoritmi Energy Plus

Il passo successivo è stato stabilire gli algoritmi di base su Energy plus in base alle esigenze. In particolare, si è definito:

- Shadow Calculation: AverageOverDaysInFrequency
- Surface Convection algorithm-Inside: TARP

- Surface Convection algorithm-Outside: TARP
- Heat Balance Algortithm: ConductionTransferFunction
- Zone Air Heat Balance Algorithm: AnalyticalSolution

Un altro passaggio importante è settare il periodo di simulazione che, nel caso specifico, è stato impostato annuale. Successivamente, si è impostato anche il time step della simulazione ossia ogni quanto tempo devono essere registrati i vari output. Il Software permette di impostarne diversi, ovvero da timestep pari ad 1 minuto, fino a quelli pari ad 1 ora.

### 3.3 Airflow Window

Energy Plus è stato ideato come programma di simulazione energetica per edifici, e non per i singoli componenti edilizi. Nonostante ciò, le potenzialità del programma sono tali da simulare con ottimi risultati il comportamento delle singole soluzioni tecnologiche.

Sebbene ci siano stati degli aggiornamenti riguardo a componenti dinamici e innovativi, non esiste un vero modulo per le facciate trasparenti dinamiche, però ci sono delle soluzioni alternative che possono simulare il modello della DSF:

- Airflow window
- Zone airflow
- Airflow network

### 3.3.1 Airflow Control

La soluzione <u>Airflow Window [8]</u> ovvero "finestre ventilate" è la soluzione che si è scelto di utilizzare per modellare la DSF. Essa ipotizza che ci sia un flusso d'aria forzato nell'intercapedine tra due lastre di vetro adiacenti e può essere adottata per doppi e tripli vetri. In quest'ultimo caso, si assume che il flusso d'aria passi attraverso l'intercapedine più interna. Quindi è come se si avesse una facciata vetrata costituita da un serramento vetrocamera esterno, una cavità ventilata e una lastra singola di vetro a contatto con l'ambiente interno. Inoltre, la cavità sarà attraversata solo dall'aria e non da altri gas come, ad esempio, l'argon o kripton (che normalmente vengono utilizzati nei vetri camera per aumentarne la resistenza termica). All'interno dell'intercapedine ventilata può essere inserita anche una schermatura solare (tenda o veneziana): in sua presenza, la portata d'aria viene ripartita nelle due cavità che si vengono a creare. È importante sottolineare

che tale schermatura deve essere posizionata nella mezzeria dell'intercapedine e come vedremo in seguito nel paragrafo relativo alle schermature bisogna effettuare altri accorgimenti. Dalla definizione di questa soluzione possiamo subito riscontrare una limitazione del software, ovvero non è possibile simulare la DSF con ventilazione naturale, in quanto è sì possibile inserire un flusso, ma tale soluzione non permette la differenziazione tra le due tipologie di ventilazione.



Figura 22 – Airflow window con schermatura in mezzeria dell'intercapedine

Attraverso la classe di "*Window Property:Airflow Control*" presente nell'IDF editor è possibile impostare tutte le configurazioni della DSF classificate secondo il criterio della modalità di ventilazione(Exhaust Air, Indoor Air Curtain, Outdoor Air Curtain, Supply Air ). Per la configurazione in Thermal Buffer si è impostata, invece, una portata pari a zero.

Quindi i parametri da impostare all'interno della classe" Airflow *Control*", sono la destinazione e la sorgente del flusso, e dal momento che si assume che la ventilazione è forzata bisogna impostare anche una portata d'aria "*Maximum Flow Rate*", espressa in m<sup>3</sup>/s\*m poiché riferita a 1 m di larghezza di cavità.

Si può anche impostare il tipo di controllo di effettuato sulla ventilazione:

- Valore costante di portata (indicato precedentemente nel Maximum flow Rate)
- "Always off", ovvero non è presente nessun flusso
- Portata variabile gestita attraverso una schedule

(0001) WindowProperty:AirflowControl (0001) Lights (0001) Daylighting:Controls (0001) Daylighting:ReferencePoint		ID: A1 Select from list of objec This field is required.
Field	Units	ОБј1
Name		Dsf glass
Airflow Source		IndoorAir
Airflow Destination		OutdoorAir
Maximum Flow Rate	m3/s-m	0.014
Airflow Control Type		AlwaysOnAtMaximu
Airflow Is Scheduled		No
Airflow Multiplier Schedule Name		
Airflow Return Air Node Name		

Figura 23 – Class Airflow Control -Configurazione Exhaust Air

Un' ulteriore limitazione di questo modulo è rappresentata dal numero massimo di strati che possono costituire la facciata vetrata. È possibile inserire solo 8 strati, nei quale vengono conteggiati anche gli strati di gas contenuti nel vetro camera. Tale configurazione corrisponde ad una stratigrafia composta da: vetro singolo interno, doppio vetro esterno intercapedine suddivisa in due strati a causa della schermatura presente nella mezzeria, e da un vetro doppio.



Figura 24 – Configurazione completa per un Airflow window

Inoltre, è importante sottolineare come questa configurazione non permetta di esportare come output, la temperatura all'interno della cavità, e le temperature superficiali delle due pelli sul lato rivolto verso la cavità. Gli unici output che Energy plus fornisce con questa soluzione sono le temperature superficiali del vetro interno e esterno, le cui facce sono rivolte rispettivamente verso l'ambiente interno e l'ambiente esterno, e *"Surface Window Gap Convective Heat Transfer Rate"* ovvero il calore guadagnato (o perso) dall'aria all'interno della cavità con le superfici con cui entra in contatto.

### 3.3.2 Software Window 7.7

Essendo la DSF, caso di studio, formata da due pelli con vetro camera e all'interno dell'intercapedine è posizionata una schermatura solare, si avrebbe una struttura composta da 9 strati, per questo motivo non sarebbe modellabile su Energy Plus con il modulo "Airflow window". Per ovviare a questo problema si è deciso di utilizzare il software WINDOW, per ottenere un vetro singolo equivalente ad una delle due pelli.

In particolare, è stata ricreata la stratigrafia di una pelle sul software come possiamo vedere di seguito:

		ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond	Comment
GL	ess 1 ++	4501	clearlite_33.2.gvb	#	6.5		0.794	0.072	0.072	0.895	0.080	0.080	0.000	0.841	0.841	0.696	
G	ap1 🔸	9	Air (10%) / Argon (90%) Mix		16.0												
- GI	ss 2 ++	4387	itop_33.2.gvb	#	6.5	X	0.517	0.327	0.199	0.862	0.055	0.071	0.000	0.038	0.841	0.696	

Figura 25- Stratigrafia singola pelle

E successivamente si è preso i valori equivalenti fornitici dal programma.

enter of Glass Results	Temperature Data	Optical Data	Angular Data	Color Properties	Radiance Results			
Ufactor	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Kelf	Layer 1 Keff	Gap 1 Keff	Layer 2 Keff
W/m2-K			W/m2		₩//m-K	W/m-K	W/m-K	W/m-K
1.199	0.645	0.561	414	0.774	0.0435	0.6960	0.0247	0.6960

Figura 26 – Parametri termici vetro equivalente

Center of Glass Results Temperature Data Optical Data Angular Data Color Properties Radiance Results

	Visible Solar UV						Solar				
Tvis	Rívis	Rbvis	Tsol	Rfsol	Rbsol	Abs1	Abs2	Tdw-K	Tdw-ISO	Tuv	
0.7744	0.1238	0.1301	0.4495	0.2683	0.2270	0.1724	0.1098	0.1890	0.4695	0.0000	

Figura 27 – Parametri ottici vetro equivalente

### 3.3.3 Stratigrafia DSF

Effettuata questa semplificazione, si è impostato nella classe *"Window Material: Glazing"* i tre vetri costituenti la DSF con tutte le loro caratteristiche termiche e ottiche:

Field	Units	Obj1	ОБј2	О Бј З
Name		clearlite_33.2	itop plus_33.2	glass semplified
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name	0			
Thickness	m	0.0065	0.0065	0.029
Solar Transmittance at Normal Incidence		0.794	0.517	0.4495
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.072	0.199	0.2683
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.072	0.327	0.227
Visible Transmittance at Normal Incidence		0.895	0.862	0.7744
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence	0	0.08	0.071	0.1238
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence	0	0.08	0.055	0.1301
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0.84	0.84	0.84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0.84	0.84	0.84
Conductivity	W/m-K	0.696	0.696	0.0493
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittanc		1	1	1
Solar Diffusing		No	No	No
Young's modulus	Pa	7200000000	7200000000	72000000000
Poisson's ratio	00000	0.22	0.22	0.22

Figura 28 – Classe Window Material Glass

Il passo successivo è stato definire gli object relativi ai gas contenuti nel vetro camera della pelle esterna e all'aria contenuta nella cavità definendone per entrambi lo spessore, attraverso le classi rispettivamente "*Window Material: Gas Mixture*" e "*Window Material: Gas*".

In seguito, come si è fatto per i componenti opachi, si è impostata la stratigrafia del componente trasparente sempre nella classe *"Construction"* e si è associata alla superficie relativa ovvero la facciata posizionata a sud, questa volta nella classe *"FenestrationSurface:detailed"* 

Field	Units	Obj1
Name		Dist glass
Surface Type		Window
Construction Name		Double_skin_facad
Building Surface Name		SOUTH WALL
Outside Boundary Condition Object		
View Factor to Ground		autocalculate
Frame and Divider Name		
Multiplier		1
Number of Vertices		autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	0.1
Vertex 1 Y-coordinate	m	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2.72
Vertex 2X-coordinate	m	0.1
Vertex 2 Y-coordinate	m	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0.64
Vertex 3X-coordinate	m	1.548
Vertex 3 Y-coordinate	m	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0.64
Vertex 4 X-coordinate	m	1.548
Vertex 4 Y-coordinate	m	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2.72

Figura 29 – Classe Fenestration Surface

Infine, ma molto importante, all'interno della classe "*Airflow Control*", nella riga relativa al nome bisogna scegliere in un menu a tendina a quale componente finestrata associare tale soluzione.

# 3.4 Window Shading control

La schermatura delle finestre con tende persiane o schermi è utilizzata per ridurre la quantità di radiazione solare che penetra nella finestra e riduce il rischio di abbagliamento.

Con la classe "Window shading control "si può specificare la tipologia di schermatura solare utilizzata, la tipologia del controllo da attuare (se presente) il tipo e l'eventuale parametro di controllo. Ad esempio, nel caso di utilizzo di una veneziana è possibile definire in questa classe l'inclinazione delle lamelle, nel caso di utilizzo di una tenda invece si può solamente controllare se abbassarla interamente o meno.



Figura 30 – Esempi di posizionamento schermatura

Occorre sottolineare che, come già detto in precedenza, in presenza di schermatura all'interno di una facciata ventilata essa va posizionata nella mezzeria dell'intercapedine. Inoltre, bisogna impostare una doppia stratigrafia: una in cui non è presente la tenda, quindi si ha la cavita per intero, ed un'altra stratigrafia in cui la cavità è divisa a meta e tra le due intercapedini viene posizionata la schermatura.

Ођб	ОБј7
Double_skin_facade WITH BLIND	Double_skin_facade
clearlite_33.2	clearlite_33.2
Gap_9_W_0_0160	Gap_9_W_0_0160
itop plus_33.2	itop plus_33.2
Air cavity 12 cm	Air cavity 25 cm
Roller shade	glass semplified
Air cavity 12 cm	
glass semplified	

Figura 31 – stratigrafia con e senza tenda

Inoltre, bisogna stabilire il controllo, che può essere impostato su configurazione statica (ovvero sempre "ON" o su "OFF"), gestito tramite schedule, garantendo così una certa dinamicità al controllo, o da altre routine di controllo prestabilite.

[0001] WindowShadingControl [0001] WindowProperty:AirflowControl [0001] Lights	Fi ID ✓ Se	eld Description: Used only if Shading Type = Inl : A10 elect from list of choices
Field	Units	ОБј1
Name		DSF WITH BLIND
Zone Name		zona termica 1
Shading Control Sequence Number		1
Shading Type		BetweenGlassShade
Construction with Shading Name		Double_skin_facade WITH BLIND
Shading Control Type		AlwaysOff
Schedule Name		- 12 St.
Setpoint	W/m2, W or deg	
Shading Control Is Scheduled		No
Glare Control Is Active		Yes
Shading Device Material Name		
Type of Slat Angle Control for Blinds		FixedSlatAngle
Slat Angle Schedule Name		
Setpoint 2	W/m2 or deg C	-
Daylighting Control Object Name		Zone_twins_Daylight
Multiple Surface Control Type		Sequential
Fenestration Surface 1 Name		Dsf glass

Figura 32 – Classe Shading Control

# 3.5 Impianto di climatizzazione

Per il controllo della temperatura interna all'interno della zona termica, è stato implementato un sistema impiantistico semplice, scelto nel settore "HVAC Templates". Si tratta della classe "*Ideal Load Air System*" con cui si modella un impianto ideale ad aria, normalmente utilizzato per simulazione volte a definire carichi di raffrescamento e di riscaldamento.

Il metodo per definire l'intero impianto è molto semplice. Innanzitutto, si inserisce un termostato per impostare i valori di setpoint per il riscaldamento e il raffrescamento (o impostare delle schedule per il funzionamento) e, in seguito, si associa il termostato alla zona termica di cui si vuole controllare la temperatura.

[0001] HVACTemplate:Thermostat [0001] HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSy [0001] Output:VariableDictionary	stem	set of setpoint schedules may have two thermostat for "Storage".
Field	Units	ОБј1
Name		set point winter
Heating Setpoint Schedule Name		setpoint year
Constant Heating Setpoint	C	3-
Cooling Setpoint Schedule Name		setpoint year
Constant Cooling Setpoint	C	

Figura 33 – Classe HVAC Template termostato

Il passo successivo, è impostare la classe "*HVAC Template:Zone IdealLoadAirSystem*", nella quale si associa il termostato e i limiti di temperatura dell'aria immessa, utilizzata sia per riscaldare che per raffrescare.

Inoltre, si sono impostate delle schedule ("Heating Availability schedule Name" e "Cooling Availability schedule Name"), in modo tale che, nella stagione invernale, l'impianto si accenda solo per riscaldare l'ambiente, e nel caso in cui si registri una temperatura più alta di quella di setpoint, l'impianto rimanga spento, in quanto questa differenza positiva di temperatura risulta essere un apporto gratuito all'ambiente. Stessa cosa succede nella stagione estiva, ma a parti invertite.

Field	Units	ОБј1
Zone Name		zona termica 1
Template Thermostat Name		set point winter
System Availability Schedule Name		ALWAYS 1
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0.0156
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0.0077
Heating Limit		NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Sensible Heating Capacity	W	
Cooling Limit		NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Total Cooling Capacity	W	
Heating Availability Schedule Name		heating always off
Cooling Availability Schedule Name		cooling always off
Dehumidification Control Type		ConstantSensibleHe
Cooling Sensible Heat Ratio	dimensionless	0.7
Dehumidification Setpoint	percent	60
Humidification Control Type		None
Humidification Setpoint	percent	30
Outdoor Air Method		None
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s	0.00944
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s	
Design Specification Outdoor Air Object Name		

Figura 34 – Classe "HVAC Template Zone:Ideal Load Air System

### 3.6 Impianto di illuminazione

L'ultimo aspetto da stabilire all'interno del modello è quello relativo all'illuminazione.

In questo caso si è proceduto a definire delle schedule che stabiliscono i profili di utilizzazione in riferimento all'illuminazione, all' occupazione e alle apparecchiature luminose,

Considerando che la cella rappresenta un prototipo di ufficio [9], si è scelto come profilo di utilizzo, quello dell'orario di lavoro ovvero 8-18 e per le restanti ore l'impianto risulterà spento. Nella tabella sottostante sono indicati gli apporti interni:

OCCUPAZIONE	0.12346 Persone/m <sup>2</sup>
ILLUMINAZIONE	11.84 W/m <sup>2</sup>
APPARECCHIATURE ELETTRICHE	12 W/m²

Tabella 6 - Apporti interni

Le schedule impostate su Energy Plus sono suddivise in tre livelli, ciascuno dei quali dipende dal precedente. In particolare, si è andati a definire prima una schedule giornaliera, successivamente una settimanale e infine una annuale. Tutti i profili sono stati impostati attraverso un fattore di utilizzo orario, distinguendo anche tra giorni feriali e giorni festivi, e in particolare nella fascia lavorativa 8-17 si è impostato 0.3, considerando anche l'apporto della luce solare, invece, nella fascia 17-18 si è impostato 1, in quanto la luce solare non fornisce più un contributo.

In un secondo momento, si è passati ad impostare la classe "*Light*", indicando la potenza di illuminazione normalizzata rispetto alla superficie del pavimento.

[0001] Lights		Explanation of Object an
[0001] Daylighting:Controls   [0001] Daylighting:ReferencePoint   [0001] Zonehrlittation:DesignFlowRate   [0001] HVACT emplate:Thermostat   [0001] HVACT emplate:Cone:IdealLoadsAirSystem   [0001] Output:VariableDictionary   [0001] Output:Constructions		Object Description: Sets If you use a ZoneList in to all the zones in the Zo Field Description: ID: A1 Enter a alphanumeric va
Field	Units	Obj1
Name		Zone_twins_Lights
Zone or ZoneList Name		zona termica 1
Schedule Name		OFFICE BLDG LIGH
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Lighting Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	11.8403571
Watts per Person	W/person	
Return Air Fraction		0
Fraction Radiant		0.42
Fraction Visible		0.18
Fraction Replaceable		
End-Use Subcategory		
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature	1	
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co	1	
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co	1/K	
Return Air Heat Gain Node Name		

Figura 35 - Classe Light

Infine, è importante andare a definire un controllo dell'impianto di illuminazione. Per far ciò inizialmente si è impostato un punto all'interno della cella in cui viene misurato il livello di illuminamento dovuto alla luce naturale. Esso dipende da diversi fattori, come le condizioni climatiche esterne, la posizione del sole, il fattore di trasmissione solare delle finestre, il coefficiente di riflessione delle superfici interne. Di seguito è riportata la posizione di tale punto.

100011 Daylighting:ReferencePoint 100011 ZoneInfiltration:DesignFlowRate 100011 HVACTemplate:Thermostat	1] Daylighting:ReferencePoint 1] ZoneInfiltration:DesignFlowRate 1] HVACTemplate:Thermostat	
Field	Units	Оыі
Name		Daylight_RP
Zone Name		zona termica 1
X-Coordinate of Reference Point	m	0.824
Y-Coordinate of Reference Point	m	1.774
Z-Coordinate of Reference Point	m	0.94



In base ai fattori precedentemente elencati, il software permette di determinare in termini di lux, l'illuminamento in quel punto, e attraverso la classe "*Day lighting:Control*" si va a stabilire un valore di Illuminamento di setpoint, in questo caso pari a 500 lux, si indica il punto di controllo scelto, perché ovviamente è possibile stabilirne diversi. In base a questo valore di setpoint, Energy Plus intuisce se l'impianto di illuminazione deve accendersi o meno. Inoltre, si stabilisce anche un valore soglia minimo per la potenza di impianto. Attraverso questa classe, è possibile gestire l'illuminazione in ogni punto della zona termica, garantendo così un buon livello di comfort interno dal punto di vista dell'illuminazione.

UUUT Daylighting:Controls (0001) Daylighting:ReferencePoint (0001) ZoneInfiltration:DesignFlowRate (0001) HVACTemplate:Thermostat	v	ID: N1 Default: 0.3 Range: 0 <= X <= 0.6
Field	Units	Оыі
Name		Zone_twins_Daylig
Zone Name	0	zona termica 1
Daylighting Method		SplitFlux
Availability Schedule Name		ALWAYS ON
Lighting Control Type		Continuous
Minimum Input Power Fraction for Continuous or Continu		0.1
Minimum Light Output Fraction for Continuous or Continu		0.1
Number of Stepped Control Steps		1
Probability Lighting will be Reset When Needed in Man		1
Glare Calculation Daylighting Reference Point Name		Daylight_RP
Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clock	deg	
Maximum Allowable Discomfort Glare Index		22
DElight Gridding Resolution	m2	
Daylighting Reference Point 1 Name		Daylight_RP
Fraction of Zone Controlled by Reference Point 1		1
Illuminance Setpoint at Reference Point 1	lux	500
Daylighting Reference Point 2 Name		
Fraction of Zone Controlled by Reference Point 2		
Illuminance Setpoint at Reference Point 2	lux	
Daylighting Reference Point 3 Name		
Fraction of Zone Controlled by Reference Point 3		
Illuminance Setpoint at Beference Point 3	lux	

Figura 37 - Classe Daylighting Control

# 3.7 Output

La scelta degli output è sicuramente legata agli obbiettivi della tesi, ossia il controllo delle condizioni climatiche, il confronto tra i dati sperimentali e quelli simulati, la determinazione di quei parametri prestazionali della DSF enunciati in precedenza.

Per tale motivo in relazione alla validazione del modello le grandezze misurate sono:

- Temperatura dell'aria interna
- Velocita del flusso all'interno della cavita
- Radiazione solare incidente e trasmessa
- Temperature superficiali di ogni superficie della cella
- I flussi termici che attraversano la cella

Quindi gli OUTPUT scelti per la calibrazione sono:

- Zone Mean Air Temperature [°C]
- Surface Inside Face Temperature [°C]
- Surface Outside Face Temperature [°C]
- Site outdoor Air Drybulb Temperature [°C]
- Site Outdoor Air Relative Humidity [%]
- Surface Outside Face Beam Solar Incident Angle Cosine Value
- Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area [W/m<sup>2</sup>]
- Schedule portata [m<sup>3</sup>/s]

# Gli output per il parametro Total Facade Heat Transfer:

- Surface Window Inside Face Glazing Zone Convection Heat Gain Rate [W]
- Surface Window Inside Face Glazing Net Infrared Heat Transfer Rate [W]
- Surface Window Transmitted Solar Radiation Rate [W]
- Surface Window Gap Convective Heat Transfer Rate [W]

Gli output per il parametro Visual metric/UDI:

- Daylighting Reference Point 1 Illuminance [lux]
- Daylighting Lighting Power Multiplier

# Gli output per il parametro Fabbisogno di energia primaria:

- Zone Air System Sensible Heating Rate
- Zone Air System Sensible Cooling Rate
- Zone Lights Electric Power

### 3.8 Simulazione parametrica – Analisi output

Una delle limitazioni del Software di simulazione è quello di non poter avere un controllo dinamico sulle configurazioni della DSF. Infatti, per poter analizzare le diverse configurazioni bisogna agire manualmente sui vari objects impostati precedentemente. Per questo motivo è stato introdotto Matlab, dove attraverso uno script è stato possibile impostare una simulazione parametrica, che ha permesso di impostare rapidamente tutte le configurazioni della DSF e successivamente di effettuare un'analisi degli output di ogni configurazione.

Il workflow operativo può essere così riassunto:

1. Creazione di un file IDF template nel quale sono stati impostati le variabili dello studio parametrico;

- 2. Modifica delle variabili tramite un range di parametri scelti dall'utente;
- 3. Lancio della simulazione Energy Plus tramite Matlab;
- 4. Salvataggio degli output e dei file idf per ogni configurazione.

UUUT] WindowShadingLonitol (0001) WindowPropertyStitiowControl (0001) Lights (0001) Daylighting:Controls (0001) Daylighting:ReferencePoint	
Units	Obj1
100000	0.12
	%AirflowSource%
(200	%AirflowDestination
m3/s-m	123456783
	AlwaysOnAtMaximu
	No
	Units m3/s-m

Figura 38 - File template parametro window

001   WindowShadingControl   dx     0011   WindowProperty/AirflowControl   Fill     0011   Lights   ID     0011   Daylighting:Controls   ID     00011   Daylighting:ReferencePoint   El		Soors (ref: FenestrationS field Description: Refer D: A1 Enter a alphanumeric va	
Field	Units	Obj1	
Name		DSF WITH BLIND	
Zone Name		zona termica 1	
Shading Control Sequence Number		1	
Shading Type		BetweenGlassShad	
Construction with Shading Name	1	Double_skin_facad	
Shading Control Type	1	%ShadingControl%	
Schedule Name		and the second states of	
Setpoint	W/m2, W or deg	1	
Shading Control Is Scheduled		No	
Glare Control Is Active		Yes	
Shading Device Material Name			

Figura 39 - File template parametro blind

Ν	Nome configurazione	Airflow source	Airflow destination	Shading control
1	Exhaust Air	Indoor	Outdoor	ON
2	Exhaust Air	Indoor	Outdoor	OFF
3	Outdoor Air Curtain	Outdoor	Outdoor	ON
4	Outdoor Air Curtain	Outdoor	Outdoor	OFF
5	Indoor Air Curtain	Indoor	Indoor	ON
6	Indoor Air Curtain	Indoor	Indoor	OFF
7	Supply Air	Outdoor	Indoor	ON
8	Supply Air	Outdoor	Indoor	OFF
9	Thermal buffer	Maximum	0	ON
10	Thermal buffer	flow rate	0	OFF

Infine, nella tabella sottostante vengono riassunte tutte le possibili configurazioni

È importante sottolineare che per la configurazione Thermal buffer si è impostato come parametro il Maximum Flow Rate e si è impostato pari a 0.

# 3.9 Descrizione sistema sperimentale

Nelle figure sottostanti vengono mostrati il posizionamento e i sensori utilizzati, di seguito viene riportato l'elenco dei sensori:

- 7 termocoppie per la misura della temperatura superficiale interna per i componenti opachi della cella (vedi figura 42)
- 2 termocoppie per la misura della temperatura superficiale esterna del vetro esterno della DSF
- 2 termocoppie per la misura della temperatura superficiale interna del vetro esterno della DSF
- 2 termocoppie per la misura della temperatura superficiale esterna del vetro interno della DSF
- 2 termocoppie per la misura della temperatura superficiale interna del vetro interno della DSF
- 1 Sensore PT100 per la misura della temperatura dell'aria interna
- 1 Sensore PT100 per la misura della temperatura dell'aria esterna
- 2 Sensori PT100 per la misura della temperatura dell'aria di immissione e ripresa dell'impianto
- 1 termoresistenza per la misura della temperatura dell'aria all'ingresso della cavità

Tabella 7 - Riepilogo configurazioni

- 1 termoresistenza per la misura della temperatura dell'aria all'uscita della cavità
- 4 termoresistenza per la misura della temperatura dell'aria all'interno della cavità
- 1 termocoppie per la misura della temperatura del telaio superiore
- 1 termocoppie per la misura della temperatura del telaio inferiore
- 4 anemometri per misurare la velocita dell'aria all'interno della cavita
- 3 termoflussimetri poste ad altezze diverse sulla pelle interna di cui due verso la cavità, ed una orientata verso l'interno (HF int 1,5) (vedi figura 41)
- 3 termoflussimetri poste ad altezze diverse sulla pelle esterna di cui due verso la cavità, ed una orientata verso esterno (HF ext 1,5) (vedi figura 41)
- 1 anemometri esterno per la velocita del vento
- 1 piranometro installato sulla pelle interna per misurare la radiazione solare trasmessa dalla doppia pelle
- 1 piranometri installato sulla pelle esterna per misurare la radiazione incidente sulla facciata a Sud
- 1 piranometro esterno per misurare la radiazione solare orizzontale globale.



Figura 40 termocoppie superficiali sulle due pelli(sinistra) – termocoppie e anemometri all'interno della cavita(destra)



Figura 41 Termoflussimetri all'interno della cavita (sinistra) – Piranometri (destra)



Figura 42 -termocoppie superficiali involucro opaco





Figura 43 - piranometro superficiale (sinistra) e anemometro(destra)

I termoflussimetri sono strumenti formati da un composto plastico ceramico e permettono di misurare il flusso termico specifico. Sono costituiti da una serie di termocoppie che misurano la differenza di temperatura ai capi del corpo ceramico, la quale è proporzionale al flusso termico. I piranometri, invece, sono strumenti capaci di misurare la radiazione solare globale incidente. Essi sono costituiti da una termopila con rivestimento nero e una cupola di vetro. Il rivestimento ha il compito di assorbire la radiazione solare e convertirla in calore. Tale calore produce una variazione di temperatura registrata dalla termopila, che è proporzionale all'irraggiamento solare. Il secondo componente invece ha il compito di limitare lo spettro solare e protegge il sensore dalle condizioni climatiche avverse.

Sono stati effettuati degli accorgimenti particolari per evitare che ci fossero degli errori di misura:

- Le termocoppie per la misura della temperatura dell'aria interna sono state schermate dalla radiazione solare tramite dei cilindri di cartone (figura 44)
- Le termocoppie utilizzate per la misura della temperatura superficiale esterna sono state schermate da semi-cilindri di materiale plastico ricoperto da nastro alluminato (figura 44)



Figura 44 Sensore pt100 temperatura interna (sinistra) - termoflussimetro (destra)

Tutti i sensori sono stati collegati tramite Smartbox, i quali possono essere collegati ad una sola tipologia di sensori (funzionamento, o tipologia di sensori), ed utilizzano il seguente sistema: Lab View. Il quale è stato utilizzato per analizzare i dati relativi ai sensori dei parametri prestazionali della DSF: termoflussimetri, termocoppie, anemometri all'interno della cavità ma anche alcuni parametri climatici. Tale sistema si basa sul protocollo Modbus.

# **4. CALIBRAZIONE**

La calibrazione è uno strumento di analisi che permette di eliminare, o quanto meno assottigliare, le differenze che ci possono essere tra le prestazioni di un modello simulato e quelle del modello empirico. Come viene specificato nell'articolo della dott.ssa Monetti Valentina [12], sono molti gli aspetti da considerare durante la calibrazione di un modello energetico, tra cui l'individuazione degli input significativi, l'accuratezza nell'acquisizione dei dati misurati e delle condizioni climatiche.

Sicuramente il primo passo da compiere prima di effettuare la calibrazione, è verificare che il modello simulato sia stato modellato correttamente e i vari dati di input, che possono essere sia relativi all'involucro e che all'impianto, siano stati inseriti correttamente.

Esistono diversi approcci per effettuare la calibrazione, alcuni semplificati ed altri molto dettagliati, quello tipicamente più utilizzato, utilizzato in questo caso studio, è quello empirico, che si fonda sulla modifica dei parametri, di cui non si è certi o si è ipotizzato, "per tentativi ed errori". In pratica, si va a confrontare gli output simulati con quelli misurati e se vengono rispettati degli indici, descritti successivamente, il modello risulta calibrato; altrimenti si sceglie un altro valore di quel parametro e si procede con una nuova iterazione.

Come detto in precedenza è importante stabilire il grado di calibrazione del modello, e questo è reso possibile grazie ai seguenti indici:

• NMBE (Normalized Mean Bias Error)

Rappresenta l'errore percentuale utilizzato per quantificare l'accuratezza del modello di simulazione per la stima dei parametri misurati in un certo intervallo di tempo.

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

Dove n rappresenta il numero delle misurazioni e Xsim, Xesp rappresentano rispettivamente il valore simulato e il valore misurato del parametro di riferimento.

Poiché questo indice presenta degli errori di compensazione ovvero la differenza tra i due valori può essere sia negativa che positiva. Queste due casistiche potrebbero compensarsi generando

un indice molto basso che non porterebbe ad una valida calibrazione, per questo motivo è importante calcolare il secondo indice.

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

Il quale elevando al quadrato la differenza tra i due valori, permette di eliminare l'errore descritto precedentemente.

Tale indice è molto significativo e se risulta inferiore ad un limite stabilito dalla normativa, possiamo ritenere il modello calibrato.

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

A è il valore medio della grandezza misurata presa in esame nel periodo di tempo considerato, e RMSE è l'errore medio quadratico medio calcolato come:

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

L'ASHRAE Guideline 14:2002 stabilisce i valori limite di tali indici, in base all'intervallo di tempo considerato, orario o mensile:

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

Tabella 8 - Valori limite indici di calibrazione

Il software Matlab, programma per il calcolo automatico e analisi statistica, ha permesso di rendere il processo di calibrazione automatico. In questo modo è stato possibile analizzare diverse configurazioni in pochissimo tempo, ma soprattutto ha permesso di rendere il processo versatile e reversibile. Questo è stato consentito mediante la creazione di uno script basato sulla simulazione parametrica che tramite l'impostazione, come input, di un vettore composto da un range di valori, assunti dal parametro da calibrare, fornisce degli output. In particolare, questi sono il valore degli indici di calibrazione per ogni configurazione simulata e i grafici di confronto

tra i due profili, misurato e simulato, della grandezza presa in considerazione. La versatilità sta nel fatto che analizzando gli output, è possibile individuare l'andamento della calibrazione dei valori inseriti come input e permette, successivamente, di andare a modificare con esigui passaggi i parametri inziali ottenendo rapidamente i nuovi output. Invece, la reversibilità sta nel fatto che, se si è commesso un errore è possibile tornare indietro per correggerlo, da ciò ne consegue l'aggiornamento automatico di tutti i passaggi seguenti; al contrario di una calibrazione eseguita manualmente, in cui un eventuale errore comporterebbe notevoli problematiche, come ad esempio un notevole dispendio di tempo.

# 4.1 Acquisizione dei dati misurati

Il primo passo, per poter procedere con la calibrazione, è sicuramente l'acquisizione dei parametri reali della cella, oggetto di studio. È importante verificare che tale acquisizione venga effettuate in modo corretto evitando errori di misura ma soprattutto errori di post elaborazione. Come già descritto nel paragrafo 3.9 è stato possibile misurare i vari parametri relativi alla DSF. Inoltre, si è ricavato i parametri relativi alle condizioni climatiche esterne ed interne e quelli relativi alla cella, come ad esempio la temperatura interna, e la temperatura superficiale media delle varie superfici che costituiscono la cella. Questi dati come vedremo in seguito sono importanti per la calibrazione in free running (ovvero impianto spento).

Le configurazioni prese in esame sono molteplici e sono state monitorate in intervalli di tempo diversi, come è possibile notare nella tabella sottostante.

CONFIGURAZIONE	CURT/NO CURT	VENTILAZIONE	INIZIO	FINE
MODELLO TB SETPOINT	CURT	-	08/01/2020 00:00	17/01/2020 08:00
MODELLO TB SETPOINT	NO CURT	-	18/01/2020 00:00	27/01/2020 09:00
MODELLO TB FREE	NOCURT	-	12/02/2020 00:00	19/02/2020 00:00
MODELLO OAC	NO CURT	MECCANICA	30/07/2020 00:00	05/08/2020 20:00
MODELLO OAC	CURT	NATURALE	15/09/2020 00:00	21/09/2020 23:00
MODELLO OAC	CURT	MECCANICA	22/09/2020 00:00	30/09/2020 23:00
MODELLO OAC	NO CURT	NATURALE	04/10/2019 00:00	14/10/2019 00:00
MODELLO EA	NOCURT	MECCANICA	01/09/2020 00:00	07/09/2020 10:00
MODELLO EA	CURT	MECCANICA	08/09/2020 00:00	14/09/2020 00:00

#### Tabella 9 – Riepilogo configurazioni

In un secondo momento, per ogni configurazione, i parametri misurati sono stati post processati, tramite l'ausilio del software Matlab. Questo ha permesso di eliminare i dati che presentavano degli errori di misura, e di filtrare i dati non coerenti. Inoltre, è stata effettuata la media per i parametri di cui erano stati presi delle misure in vari punti, come ad esempio la velocità del flusso, o la temperatura superficiale.

Infine, si è proceduto alla creazione di due schedule, derivanti dai dati misurati, per la portata di ventilazione all'interno della cavità e della T inside, in modo tale da ricreare perfettamente le condizioni al contorno reali all'interno del modello simulato.

### 4.2 Modifica dei dati climatici

Per poter effettuare una simulazione energetica è importante definire le condizioni climatiche in cui l'edificio e l'impianto dovranno funzionare.

Per la calibrazione è dunque necessario acquisire le condizioni meteorologiche dell'ambiente esterno durante il periodo di misura. Per questo motivo, sono stati utilizzati i dati provenienti dalla stazione meteo del Politecnico di Torino da cui si è ricavati i seguenti dati, che sono forniti al quarto d'ora:

- Temperatura dell'aria esterna [°C]
- Umidità relativa [%]
- Pressione atmosferica [hPa]
- Velocita del vento[m/s]
- Direzione del vento [°]
- Radiazione solare globale [W/m<sup>2</sup>]

Successivamente, si è proceduto a modificare il file standard climatico di Torino, inserendo solo i dati relativi agli intervalli di tempo in cui si sono misurati i dati, e quelli della settimana antecedente a tali intervalli per tenere conto del warm up che Energy plus effettua prima di iniziare la simulazione. Per poter fare questo procedimento, ci si è serviti di Matlab, che come già descritto in precedenza, ha permesso di rendere tale processo più rapido e automatico. È importante ricordare che la stazione climatica del Politecnico di Torino fornisce solo i dati relativi alla radiazione globale, invece, per il file climatico è importante definire sia la radiazione solare diffusa che quella diretta. Per questo motivo prima di inserire i nuovi dati all'interno del file climatico si è andati a scomporre, con l'ausilio del tool RadSol, la radiazione solare globale nelle due componenti diretta e diffusa.

# 4.3 Primo step: calibrazione iniziale

Questo primo step ha come obiettivo quello di verificare che il file climatico sia stato modificato correttamente e verificare i parametri ottici del DSF: trasmissione, riflessione e assorbimento solare.

Su Energy Plus è possibile modificare direttamente la riflessione e la trasmissione del vetro, questo consente indirettamente la modifica del coefficiente di assorbimento solare.

I parametri da calibrare sono:

- Trasmissione solare del vetro interno
- Trasmissione solare della tenda

Il primo parametro presenta delle incertezze in quanto, come già descritto in precedenza, è stato inserito su Energy Plus con alcune approssimazioni a causa della limitazione del modello di DSF scelto (Airflow window), per questo motivo è importante definirne correttamente tutti i valori. Nella tabella sottostante vengono definiti i valori scelti per le due fasi di questa calibrazione:

MODELLO TB INIZIALE				
	1	2	3	4
Coefficiente di trasmissione vetro equivalente	0.45	0.55	0.62	0.7
Coefficiente di trasmissione della tenda	0.04	0.06	0.08	0.09

#### Tabella 10 – Riepilogo valori per ogni parametro TB inziale

I valori in grassetto rappresentano i valori iniziali.

In seguito, si è proceduto alla modifica del file IDF in modo tale che, tramite Matlab, sia possibile modificare automaticamente il parametro e analizzare gli output dalle varie configurazioni.

#### 4.3.1 Verifica file climatico

Per stabilire che il file climatico modificato sia corretto si è scelto di controllare il parametro della radiazione solare incidente. Ovvero, si è andati a confrontare il profilo della radiazione incidente simulata con quella misurata dalle apparecchiature presenti nella cella.

Questa verifica è stata effettuata per ogni singola configurazione analizzata. Nel grafico sottostante è possibile osservare il confronto tra misurato e simulato della configurazione Thermal buffer.





Si nota che i profili sono quasi coincidenti, segnale che i dati inseriti sono corretti ed è possibile procedere con il passaggio successivo.

#### 4.3.2 Trasmissione solare vetro interno equivalente

La trasmissione solare rappresenta la parte di radiazione solare incidente che viene trasmessa dal vetro alla cella. È misurata attraverso il piranometro posizionato all'interno della cella. Essa è un parametro molto importante perché svolge un ruolo fondamentale nel bilancio termico e nei fabbisogni di energia. Può essere ricavato direttamente come output da Energy Plus selezionando la variabile "Zone Windows Total Transmitted Solar Radiation Rate". Sono due le configurazioni analizzate per validare tale parametro : Thermal Buffer con la tenda e

Thermal Buffer senza tenda



Figura 46 – Confronto radiazione trasmessa- primo parametro -TB curt iniziale



Figura 47 – Confronto radiazione trasmessa- primo parametro -TB nocurt iniziale

Come si evince da questi due grafici, il più significativo per il parametro analizzato è sicuramente quello senza tenda, perché permette di determinare il valore più adatto senza l'interferenza di altri fattori come ad esempio i parametri caratteristici della tenda.

Il profilo tratteggiato rappresenta il parametro misurato, invece, i profili continui rappresentano le differenti configurazioni a cui è associato un diverso valore del parametro. Come valore caratteristico, si è scelto uno che va a sottostimare la radiazione trasmessa per tenere conto dell'errore di misura del profilo reale.

Tale errore è dovuto al fatto che quando la radiazione solare passa attraverso la Doppia Pelle irradia tutte le pareti della cella, le quali a loro volta riflettono la luce solare che "rimbalza "sulla Doppia pelle. Questo comporta una misurazione errata della radiazione solare.

Tale differenza, tra profilo misurato e simulato, è possibile calcolarla tenendo conto del coefficiente di riflessione di tutte le pareti (stimato intorno ai 20 W).

A causa di tale errore, si è scelto come valore di trasmissione solare del vetro interno semplificato **0,5** che va a sottostimare la trasmissione solare rispetto al profilo misurato.

Il grafico della configurazione della tenda ci suggerisce che il valore della trasmissione solare della tenda dovrebbe essere più alto.

### 4.3.3 Trasmissione solare tenda

Fissato il valore del primo parametro, si è passati a determinare il secondo parametro con la stessa procedura spiegata precedentemente.



Figura 48 - Confronto radiazione trasmessa- secondo parametro -TB curt iniziale

Il valore che meglio approssima il profilo misurato è **0,9**. Anche qui si è scelto un valore che va a sottostimare la radiazione trasmessa. Tale gap è più evidente nei giorni con maggiore radiazione solare.

Infine, è possibile osservare i grafici risultanti dalle fasi precedenti per le due configurazioni; questo permette di ritenere questa prima calibrazione conclusa.

Riassumendo i valori scelti per i due parametri sono:

- Trasmissione solare del vetro interno τ=0.5
- Trasmissione solare della tenda τ=0.9



Figura 49 - Confronto radiazione trasmessa- finale -TB nocurt iniziale





# 4.4 Secondo step: calibrazione Thermal Buffer free running

La calibrazione successiva riguarda il modello in free running. La configurazione scelta è il Thermal Buffer in quanto è stata l'unica al momento misurata in free running. Quest'ultima permette di valutare il comportamento della cella in assenza di impianto con particolare riferimento alla temperatura dell'aria all'interno della stessa e alle temperature superficiali. Sono molti i parametri che possono influenzare la temperatura interna, ma quelli che si è scelto di calibrare sono:

- Conducibilità del poliuretano
- Tasso di ricambio orario

Nella tabella sottostante, è possibile osservare i valori scelti per ogni parametro, quelli in grassetto rappresentano il valore iniziale.

MODELLO TB FREE					
	1	2	3	4	5
Conducibilità del poliuretano	0.024	0.02	0.03	0.035	0.04
Tasso di ricambio orario	0.6	0.8	1	1.2	1.5

#### Tabella 11 – Riepilogo valori per ogni parametro TB free running

I parametri che si è confrontato e permettono di validare la calibrazione sono quindi:

- Temperatura aria interna
- Temperatura superficiale media delle pareti della cella

E' importante sottolineare che per le temperature superficiali delle pareti si è preso un valore medio ponderato sulle aree, in quanto la misura della temperatura è misurata puntualmente, e ipotizzata, quindi approssimata, costante su tutta la superficie. Inoltre, va ricordato che nel calcolo di tale parametro sono considerate tutte le pareti a meno di quelle esposte a Sud ovvero non si tiene conto della DSF e del telaio.

#### 4.4.1 Primo parametro: Conducibilità del poliuretano

La scelta di tale parametro è stata effettuata sulla base delle seguenti considerazioni:

- L'incertezza nella misura del valore iniziale del parametro
- La storia del materiale può aver comportato delle modifiche nelle prestazioni di quest'ultimo.
- Dopo vari tentativi, si è notato che tale parametro è quello che comporta una maggiore variazione del profilo simulato; per questo motivo è stato ritenuto uno dei più significativi.

La prima fase è stata effettuata variando tale parametro e tenendo fissi, ai valori iniziali, gli altri.



Figura 51 – Confronto T Indoor - primo parametro -TB free running





Analizzando i vari grafici, è possibile notare che il profilo che si avvicina maggiormente a quello misurato è quello con il valore minore ovvero **0,02 W/mK**, ma nonostante gli indici risultano inferiori ai limiti, il profilo simulato presenta delle problematiche sia legate al valore dei picchi che alla pendenza delle varie curve giornaliere, però possiamo notare che non è presente uno sfasamento tra i due profili dove con sfasamento termico si indica la differenza di tempo fra l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie esterna della struttura, e l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie interna della stessa.

#### 4.4.3 Secondo parametro: Tasso di ricambio orario

Definiti il primo si è passati a definire il secondo. Questa fase ha come obbiettivo quello di far raggiungere una buona coincidenza dei picchi della curva simulata rispetto a quella misurata. Il valore iniziale di questo parametro è stato ricavato attraverso il Blower Door Test. La normativa di riferimento, la UNI EN ISO 9972:2015, prevede l'utilizzo di un ventilatore a velocità variabile incassato nel telaio della porta principale con lo scopo di immettere o estrarre un flusso d'aria. In base al flusso che si crea si determina la portata di infiltrazione.



Figura 53- Confronto T Indoor - secondo parametro -TB free running



Figura 54 – Confronto T wall - secondo parametro -TB free running

È possibile notare come la variazione di questo parametro produca dei profili paralleli che non fanno variare la pendenza della curva ma solo i picchi durante le ore diurne. In accordo al valore degli indici di calibrazione si è scelto il valore **0,6** ricambi orari.

#### 4.4.4 Considerazioni finali

Riassumendo, in questa prima calibrazione, si è andati a definire i parametri fondamentali che influiscono sulla temperatura interna della cella e temperatura superficiale delle pareti, in modo tale che gli indici di calibrazione siano rispettati.

T WALL/NOCURT	
NMBE	2.91
CV	13.17
T INDOOR/NOCURT	
NMBE	-5.32
CV	10.51

Tabella 12 - Indici di calibrazione finali – TB free running

Al termine di quest'ultima fase, è possibile affermare che il modello relativo alla configurazione "Thermal Buffer Free running" è validato.

Come già detto in precedenza I parametri scelti per ottenere tale validazione sono:

- Conducibilità del poliuretano = 0.02 W/mK
- Tasso di ricambio orario = 0.6 ricambi/ora



Nelle figure sottostanti è possibile osservare I profili finali dei due parametri analizzati

Figura 55– Confronto T Indoor – finale -TB free running



Figura 56 - - Confronto T wall - finale -TB free running

# 4.5 Terzo step: calibrazione Thermal Buffer Setpoint

La fase successiva riguarda la calibrazione del modello con configurazione Thermal buffer SetPoint. Il termine SetPoint sta ad indicare che l'impianto di climatizzazione è attivo all'interno della cella, e viene garantita una temperatura costante in inverno ed estate. In pratica su Energy plus, come già descritto in precedenza, è stata impostata la schedule della temperatura di setpoint, basata sui dati misurati della temperatura dell'aria interna dell'intervallo di tempo considerato.

C'è un'ulteriore divisione nelle configurazioni analizzate, in quanto nell'intervallo considerato si è impostata una settimana in cui la tenda è abbassata, ed un'altra con la tenda alzata. Tale variazione comporta dei comportamenti differenti per la DSF. Per questo motivo si è proceduto a valutare gli indici di calibrazione per entrambe le situazioni.

Il parametro di confronto in questa terza calibrazione è la temperatura superficiale del vetro interno della DSF.

I parametri che si è scelto di calibrare sono stati scelti, sempre con un criterio di significatività, rispetto al parametro di confronto e sono:

- Coefficiente di riflessione del vetro interno
- Conducibilità del vetro interno
- Coefficiente di riflessione della tenda

I primi due presentano delle incertezze legate al vetro semplificato impostato tramite il software Window. Il terzo parametro invece ha permesso, come vedremo, di migliorare la calibrazione nella configurazione Thermal Buffer con la tenda.

Nella tabella sottostante è possibile osservare gli eventuali valori che possono assumere i parametri.

I valori in grassetto sono i valori iniziali prima della calibrazione.

MODELLO TB SETPOINT					
	1	2	3	4	5
Coefficiente di riflessione vetro equivalente	0.05	0.1	0.15	0.22	0.3
Conducibilità del vetro equivalente	0.015	0.02	0.03	0.04	0.0495
Coefficiente di riflessione vetro equivalente	0.28	0.2	0.15	0.1	0.05

#### Tabella 13 – Riepilogo valori per ogni parametro TB set point

È importante ricordare che le modifiche effettuate nella prima calibrazione sono state implementate nella configurazione oggetto di studio, prima di effettuare la nuova calibrazione. Inoltre, come si può notare nella tabella 13, si è impostato solo cinque valori per ogni parametro, ma questa è stata una scelta facoltativa. In quanto, grazie all'utilizzo del software Matlab, sarebbe stato possibile inserire un numero molto più grande di ipotetici valori che potrebbero assumere i parametri, analizzare ogni singolo valore e successivamente sceglierne il migliore, e ciò sarebbe stato possibile senza inficiare sui tempi computazionali.

#### 4.5.1 Primo parametro: Coefficiente di riflessione del vetro equivalente interno

Nella calibrazione iniziale si è definito il coefficiente di trasmissione del vetro, invece in questa fase si va a variare il coefficiente di riflessione in questo modo si va ad agire sul coefficiente di assorbimento che ha un ruolo fondamentale per la temperatura superficiale.







Figura 58 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -TB curt setpoint

Dai grafici si nota come la variazione del parametro preso in esame produca dei significativi cambiamenti nella configurazione senza la tenda rispetto alla configurazione con la tenda, dove non si riscontrano delle notevoli differenze tra le varie curve simulate. Inoltre, si evince come, per entrambi i grafici, i picchi notturni dei profili simulati presentano sempre un gap con il profilo misurato. Come viene descritto nell'articolo[10], questa differenza tra i due profili può essere dovuta al fatto che in Energy Plus, non è stata implementata I 'inerzia termica dei vetri e per questo motivo il calore immagazzinato all'interno del vetro viene rilasciata completamente e quindi la temperatura superficiale del vetro può risultare più bassa rispetto alla temperatura del vetro reale.

Quindi in base ai due grafici, il valore scelto è 0,30.
#### 4.5.2 Secondo parametro: Conducibilità del vetro equivalente interno

Poiché i grafici presentavano dei picchi giornalieri molto più alti rispetto ai valori misurati, si è ritenuto che un parametro fondamentale da calibrare dovesse essere la trasmittanza del vetro interno semplificato. La quale essendo direttamente proporzionale alla temperatura, al diminuire della trasmittanza anche la temperatura superficiale diminuisce. Per questo motivo si è scelto dei valori inferiori rispetto alla trasmittanza iniziale.



Figura 59 – Confronto T superficiale glass indoor - secondo parametro -TB curt setpoint





Si riscontra dai grafici come la scelta di diminuire la trasmittanza si sia rivelata corretta, infatti il parametro che garantisce un indice di calibrazione più basso è  $U=0.015 \text{ W/m}^{2*}\text{K}$  e analizzandone il profilo si nota come i picchi si avvicinino notevolmente al profilo misurato. Inoltre, si può osservare come tale parametro risulti "significativo" in entrambe le configurazioni, difatti, la variazione di tale parametro produce notevoli differenze nei vari profili misurati.

Infine, tali grafici confermano l'osservazione riguardo all'inerzia termica dei vetri. In quanto anche modificando vari parametri, i picchi notturni si discostano sempre dal picco notturno misurato, e le variazioni dei parametri, durante la notte non producono mai dei significativi cambiamenti. Segno che tale discrepanza sia dovuta ad una limitazione del programma Energy Plus.

#### 4.5.3 Terzo parametro: Coefficiente di riflessione della tenda

Come ultimo parametro da calibrare per tale configurazione, si è scelti il coefficiente di riflessione della tenda. La variazione di questo parametro produce delle variazioni solo nella configurazione con la tenda.





La variazione di tale parametro, anche nella configurazione con la tenda, non ha prodotto significativi cambiamenti, e gli indici sono sì diminuiti ma non di molto. Il parametro che si è impostato nel modello è **0,05**.

#### 4.5.4 Considerazioni finali

L'obbiettivo di questa seconda calibrazione è stato quello di settare i parametri in modo tale che il vetro superficiale della DSF si comportasse come quello reale.

T superficiale con tenda	
NMBE	-4.81
CV	10.00
T superficiale senza tenda	
NMBE	-3.03
CV	6.40

Osservando gli indici, nella tabella sottostante possiamo ritenere il modello calibrato.

Tabella 14 - Indici di calibrazione finali – TB setpoint

Riassumendo i parametri scelti per ottenere tale validazione sono:

- Coefficiente di riflessione del vetro interno=0.30
- Conducibilità del vetro interno=0.015 W/m<sup>2</sup>\*K
- Coefficiente di riflessione della tenda=0.05







Figura 63 - Confronto T superficiale glass indoor - finale -TB nocurt setpoint

Dai grafici sovrastanti, possiamo affermare che si è raggiunto un buon livello di approssimazione tra il modello simulato e quello misurato, per entrambe le calibrazioni analizzate. I picchi diurni sono quasi coincidenti a parte alcuni giorni come ad esempio il 22 gennaio. Ciò può essere dovuto ad a delle condizioni climatiche differenti rispetto agli altri giorni. Infatti, notiamo che rispetto agli altri giorni, tale giorno non presenta un picco ma due picchi intervallati da una linea costante, rispetto ai grafici della figura 64 dove l'andamento è simile per tutti i giorni e non sono presenti delle anomalie. Invece per entrambe le configurazioni, come già detto in precedenza, i picchi notturni simulati sono inferiori rispetto a quello misurati, e si nota una certa costanza nel valore di differenza tra i profili, all'incirca due gradi, segno che questo può essere dovuto ad una limitazione del software di simulazione rispetto ad un errore di simulazione o di inserimento dati.

# 4.6 Quarto step: calibrazione Outdoor Air Curtain SetPoint

Successivamente si è passati alla calibrazione del modello con la configurazione Outdoor Air Curtain. In questa configurazione entrano in gioco i parametri legati alla ventilazione, ovvero il flusso all'interno della cavità, la velocità di tale flusso.

Per questo motivo sono quattro le configurazioni analizzate con questa tipologia:

- OAC con ventilazione meccanica senza tenda
- OAC con ventilazione meccanica con la tenda
- OAC con ventilazione naturale senza tenda
- OAC con ventilazione naturale con la tenda

I dati relativi alla configurazione naturale senza tenda sono stati misurati un anno prima rispetto alle altre che sono state analizzate consecutivamente o quasi.

Inoltre, tali dati sono stati filtrati, soprattutto per la configurazione meccanica con la tenda, dove a causa di condizioni climatiche avverse (ovvero forte vento), è stata interrotta la configurazione OAC e si è passati in Thermal Buffer, per questo motivo i dati di questo periodo (25 settembre -30settembre) non sono stati presi in considerazione.

Come già detto in precedenza, per poter impostare la configurazione che si vuole per la DSF, bisogna impostare l'input "Airflow window". Analizzando tale input, si può osservare come le informazioni da impostare siano la destinazione, la sorgente del flusso, e la portata del flusso. Tale portata viene stabilita tramite valore fisso o tramite una schedule. Questo è uno dei limiti del software in quanto permette di agire solo sulla portata e non su altri fattori che influiscono sul flusso all'interno della cavita come i moti convettivi o l'impossibilità di poter impostare la temperatura del flusso all'ingresso della cavita.

La portata inserita nel modello è stata calcolata attraverso la velocita media misurata in quattro punti diversi all'interno della cavita e tale scelta è ponderata e confermata dall'analisi dei profili delle velocita che non presentano delle anomalie.



Figura 64 - Grafico delle velocita

È possibile notare che i due profili più bassi fanno riferimento alle misure dei sensori posizionati nella parte bassa della cavita, e gli altri due fanno riferimento ai sensori posizionati nella parte alta della cavità.

Per il motivo sopra citato, il parametro che si è scelto di andare a calibrare è un coefficiente moltiplicativo della portata misurata, tale parametro è indipendente dalle configurazioni e può assumere un valore differente a seconda della configurazione.

I valori sono stati scelti in modo tale che il valore della portata sia compreso tra 0 e 1 e variano a seconda della configurazione scelta

MODELLO OAC SETPOINT					
	1	2	3	4	5
OAC MECC NO CURT	0.5	1	1.5	2	9
OAC MECC CURT	0.7	0.8	0.9	1	
OAC NAT NO CURT	0.7	0.8	0.9	1	
OAC NAT CURT	0.7	0.8	0.9	1	

Tabella 15 – Riepilogo valori per ogni parametro OAC set point

Anche in questo caso il parametro confrontato è:

Temperatura superficiale vetro interno

Al contrario delle altre calibrazioni, si è scelti di utilizzare anche l'EMS (Energy Management System) per impostare e variare la portata ad ogni time step. Nello specifico si è impostato un piccolo programma con impostazione "BeginTimestepBeforePredictor" che permette di agire all'inizio del timestep. Si è andati a definire il sensore e l'attuatore del programma, rispettivamente la portata iniziale (impostata tramite schedule dai dati misurati) e il Flow Rate. Attraverso il programma creato si è andati a moltiplicare la portata con il coefficiente correttivo "j" ottenendo come output il Flow Rate. In seguito, si è analizzato gli output di Energy plus, in particolare la temperatura superficiale del vetro interno.

È importante ricordare che per l'intero processo di calibrazione è stata utilizzata la tecnica del *"one-step-ahead"* dunque, tutte le modifiche effettuate precedentemente sono state implementate in quest'ultimo modello.



Figura 65 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC meccanica nocurt setpoint



Figura 66 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC meccanica curt setpoint



Figura 67 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC naturale nocurt setpoint



Figura 68 – Confronto T superficiale glass indoor - primo parametro -OAC naturale curt setpoint

Analizzando i grafici, si nota che i profili simulati presentano delle discrepanze rispetto al profilo misurato, soprattutto durante i picchi notturni. Ma hanno un comportamento simile a quelli delle calibrazioni precedenti, come ad esempio la pendenza delle curve, e l'assenza di sfasamento. Questo è un segnale del fatto che le modifiche effettuate nelle calibrazioni precedenti siano corrette. Ma in questa configurazione entra in gioco, come già detto in precedenza, un altro aspetto molto importante, il flusso nella cavità.

Si evince che per ogni configurazione il parametro moltiplicativo migliore è differente, nel caso della configurazione OAC meccanica senza tenda risulta molto grande rispetto agli altri. tale valore risulta attendibile anche analizzando il grafico dei flussi radiativo-convettivi che attraversano la DSF (vedi figura 69).



Figura 69– Confronto flusso convettivo- primo parametro -OAC meccanica nocurt setpoint

Tale figura mostra come il valore 9 del coefficiente moltiplicativo, sia corretto infatti il profilo del flusso simulato è molto simile a quello misurato.

Nonostante ciò, comunque tutte le configurazioni presentano delle piccole variazioni nei picchi diurni e notturni all'incirca 2 gradi, tranne quelle relativa alla configurazione "OAC naturale nocurt "dove il profilo simulato rispecchia quasi fedelmente il profilo misurato infatti gli indici di calibrazione risultano essere molto bassi quasi pari a zero nel caso dell'indice NMBE. L'unico giorno in cui ci sono delle maggiori differenze è il 10 ottobre. Tale differenza può essere dovuta alle condizioni climatiche differente, come una minore radiazione solare incidente.

Per risolvere il problema legato ai picchi notturni e quindi cercare di ridurre maggiormente gli indici di calibrazione, sempre attraverso il programma impostato su EMS, si è provato a sottrare un flusso extra alla portata iniziale in modo tale da mantenere nelle ore notturne la temperatura più alta. Tale flusso extra era "comandato" da un secondo parametro da calibrare, che poteva assumere un valore compreso tra 0 e 1 il quale moltiplicava il minimo della portata in modo tale da non avere mai il caso in cui la portata diventasse minore di uno, che avrebbe comportato un errore sul programma di simulazione.



Figura 70– Confronto T superficiale glass indoor – combinazione coefficiente moltiplicativo e additivo - OAC naturale nocurt setpoint

La figura 70 è un esempio di quello si è descritto precedentemente. ma come si può notare, nonostante questo flusso extra la situazione non cambia di molto, infatti, la combinazione dei due parametri da calibrare mostra delle variazioni poco rilevanti tra una e l'altra. Per questo motivo, si è deciso di abbandonare questa strada e di calibrare sono il fattore moltiplicativo.

La discrepanza tra i picchi notturni può essere dovuta alla mancanza di inerzia termica dei vetri interni, in quanto non implementata nel software di simulazione.

Un altro limite riscontrato in questa calibrazione è sicuramente legato al fatto che l'unico modo di agire sulla temperatura all'interno della cavità, è solo attraverso la portata, ma per poter risolvere questo problema bisognerebbe modelli più complessi per la DSF, come ad esempio "'Airflow network".

Inoltre, un aspetto importante da non sottovalutare nella calibrazione della temperatura superficiale del vetro, ma soprattutto della temperatura all'interno della cavità, è legata all'algoritmo utilizzato per determinare i coefficienti liminari della cavita. Energy plus fornisce vari algoritmi per poterli calcolare, che però presentano delle approssimazioni che potrebbero implicare dei comportamenti diversi del modello simulato rispetto a quello reale. Per questa calibrazione si è scelto quello che forniva un indice di calibrazione migliore in particolare per il coefficiente liminare interno si è utilizzato l'algoritmo "AdaptiveConvectionAlgorithm", per il coefficiente liminare esterno l'algoritmo"MoWitt".

#### 4.6.1 Considerazioni finali

Nonostante queste problematiche enunciate, gli indici per ogni configurazione sono stati rispettati come si può notare nella tabella sottostante:

MODELLO OAC SETPOINT						
		1	2	3	4	5
OAC MECC NO CURT		0.5	1	1.5	2	9
	NMBE	2.03	1.51	1.19	0.93	-0.76
	CV	7.97	7.32	6.95	6.68	5.47
OAC MECC CURT		0.7	0.8	0.9	1	
	NMBE	-8.88	-9.24	-9.54	-9.82	
	CV	9.77	9.98	10.17	10.37	
OAC NAT NO CURT		0.7	0.8	0.9	1	
	NMBE	-0.42	-0.48	-0.52	-0.56	
	CV	3.83	3.83	3.83	3.83	
OAC NAT CURT		0.7	0.8	0.9	1	
	NMBE	-4.67	-4.90	-5.11	-5.28	
	CV	7.08	7.06	7.06	7.07	

Tabella 16 - Indici di calibrazione finali – OAC setpoint

Seguendo le indicazioni degli indici si è scelto come valore del parametro moltiplicativo della portata:

- OAC meccanica senza tenda j=9
- OAC meccanica con tenda **j=0.7**
- OAC naturale senza tenda j=0.7
- OAC naturale senza tenda j=1

Infine, di seguito si riportano i grafici finale per ogni configurazione con il valore scelto.



Figura 71 – Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC meccanica nocurt setpoint



Figura 72 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC meccanica curt setpoint



Figura 73– Confronto T superficiale glass indoor – finale -OAC naturale nocurt setpoint



Figura 74 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -OAC naturale curt setpoint

# 4.7 Quinto step: calibrazione Exhaust Air SetPoint

Quest'ultima calibrazione è stata effettuata seguendo le stesse indicazioni della configurazione in OAC.

Le configurazioni analizzate sono due:

- Exhaust Air ventilazione meccanica senza tenda
- Exhaust Air ventilazione meccanica con tenda

Come detto, il parametro di confronto è la temperatura superficiale e il parametro da calibrare è il coefficiente moltiplicativo della portata,

Di seguito si riportano i valori del parametro da calibrare e gli indici per ogni configurazione relativa ad ogni valore.

MODELLO EA SETPOINT						
		1	2	3	4	5
EA MECC NO CURT		0.7	0.8	0.9	1	
	NMBE	-3.34	-3.37	-3.40	-3.43	
	CV	5.48	5.49	5.51	5.52	
EA MECC CURT		0.6	0.7	0.8	0.9	1
	NMBE	-4.90	-4.98	-5.05	-5.11	-5.15
	CV	5.92	6.01	6.08	6.14	6.19

Tabella 17 - Indici di calibrazione finali – EA setpoint

I valori scelti per le due configurazioni sono:

- EA meccanica senza tenda j=0.7
- EA meccanica con tenda j=0.6



Infine, si riportano i grafici finali delle due configurazioni

Figura 75 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica nocurt setpoint



Figura 76 – Confronto T superficiale glass indoor - finale -EA meccanica curt setpoint

Si nota come anche questi grafici mostrano lo stesso comportamento delle configurazioni analizzate precedentemente. Un'ulteriore considerazione che si potrebbe fare è legata al fatto che, con l'aggiunta del flusso all'interno della cavità, il problema legato all'inerzia termica viene evidenziato maggiormente rispetto alla configurazione del Thermal Buffer, dove questo limite è sì presente ma si nota meno.

# **5. IMPLEMENTAZIONE DEL CONTROLLO**

In questo capitolo vengono spiegati i principi e lo svolgimento seguiti per implementazione delle strategie di controllo per la DSF. Successivamente viene fatto il confronto con i benchmark che permetterà di evidenziare gli aspetti positivi di tale procedura, come appunto la riduzione del fabbisogno di energia primaria. Per poter far ciò si è utilizzato il modulo EMS di Energy Plus, che come già detto in precedenza, permette di definire, tramite uno script, delle regole per poter cambiare il modello all'interno della stessa simulazione.

Si è impostata una simulazione annuale con timestep di 15 minuti in modo tale da poter valutare il fabbisogno di energia primaria annuale.

Le configurazioni in cui si è implementato il controllo sono:

- Outdoor Air Curtain
- Supply Air

# 5.1 Modello Energy Plus di un ufficio

In seguito alla validazione del modello della DSF, si è deciso di realizzare un nuovo modello di un ufficio situato a Torino orientato secondo gli assi cardinali e installare sulla facciata a Sud, la DSF validata in precedenza. Esso ha una dimensione standard di 3.6x4.5x2.7 m, invece, la DSF misura 3.3x1.9 m. L'ufficio è stato considerato parte di un edificio, per cui le parti verticali esclusa le facciate a sud sono adiabatiche. Si è poi andati a definire i materiali costituenti l'involucro opaco ed infine sono state impostate le schedule per definire i profili di occupazione, illuminazione, temperatura di setpoint, infiltrazione e ventilazione dell'ufficio.[9]

#### **5.2 Correlazione lineare**

Il parametro fondamentale per la DSF è sicuramente la portata all'interno della cavita, di conseguenza la velocita dell'aria. Per la calibrazione si era impostata una schedule per la portata ricavata dai dati misurati. Per eliminare questa dipendenza dai dati sperimentali, si è impostata una regressione lineare, che ha permesso di determinare la velocita in funzione di altri parametri. Tale regressione è stata effettuata su Excel, attraverso un componente aggiuntivo, chiamato Analisi dati. In seguito, si è impostato un foglio Excel nel quale si è inserito i parametri dipendente (y) e i parametri indipendenti(x) da utilizzare per la regressione. È importante sottolineare che i parametri indipendenti devono essere posizionati in sequenza e devono avere la stessa dimensione. Infine, tramite il comando regressione lineare si imposta il parametro dipendente e quelli indipendenti indicando se la funzione deve passare per l'origine o se si deve considerare l'intercetta(X1).

In seguito a vari tentativi si è scelto come parametri significativi: la radiazione incidente, la velocità del vento e la Temperatura esterna.

$$VEL = X_1 + X_2 * Q_{Inc} + X_3 * W_{Speed} + X_4 * T_{Out}$$

Come possiamo notare nel grafico sottostante, riferito alla configurazione in Outdoor Air Curtain con ventilazione naturale, la velocita aumenta con l'aumentare della radiazione solare. Ciò è dovuto al fatto che l'aria riscaldandosi maggiormente, amplifica i moti convettivi all'interno della cavita, facendo così aumentare la velocità del flusso.



Figura 77 - Grafico velocita- radiazione incidente



Di seguito si riporta il confronto della velocita di una delle configurazioni prese in esame.

Figura 78 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat no CURT



Figura 79 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mecc no CURT



Figura 80 - Confronto velocita - regressione lineare OAC nat CURT



Figura 81 - Confronto velocita - regressione lineare OAC mec CURT



Figura 82 - Confronto velocita - regressione lineare EA mec CURT



Figura 83 - Confronto velocita - regressione lineare EA mec no CURT

Per poter valutare tale regressione lineare bisogna stimare il coefficiente R<sup>2</sup>, che per le configurazioni analizzate risulta superiore al 0,6, quindi tale relazione della velocità può essere ritenuta valida.

L'obbiettivo della regressione lineare è stato ottenere dei coefficienti moltiplicativi (X1, X2, X3, X4) che permetteranno di determinare la velocità all'interno della cavità in ogni istante di tempo. Nella tabella sottostante si riportano i coefficienti per ogni configurazione analizzata. Per le configurazioni in OAC e SA si sono utilizzati gli stessi coefficienti in quando la sorgente dell'aria risulta essere la stessa ovvero l'esterno. Lo stesso discorso vale per le configurazioni in IAC e EA la cui sorgente è l'ambiente interno.

	VEL=X1+X2*Qinc+X3*Wspeed+X4*Toutdoor						
	OAC FORZATA NO	OAC FORZATA			EA FORZATA		
	CORTAIN	SICORTAIN	NO CORTAIN	SICORTAIN	NOCORTAIN	SICORTAIN	
R	0.76	0.89	0.6	0.83	0.6	0.6	
X1	0.138623873	0.124822673	0.045000017	0.037787612	0.225787058	0.346983643	
X2	6.2609E-05	0.000145037	0.000115014	0.000181623	5.90985E-05	0.000103378	
Х3	0.028048563	0.003580687	0.028083697	0.032070811	0.003146602	0.007082351	
X4	-0.00042433	0.001077133	0.004191509	0.002706946	0.000889059	0.005860431	

Tabella 18 - Coefficienti della regressione lineare

### 5.3 Controlli di riferimento: Benchmark

I Benchmark sono dei modelli standard di riferimento che permettono di valutare le prestazioni e l'efficacia del modello preso in esame.

Nel caso specifico sono 8 i modelli di riferimento, secondo il criterio di tipo di ventilazione e stato della tenda, in base ovviamente alla configurazione presa in esame:

- TB curtain
- OAC/SA curtain con portata naturale
- OAC/SA curtain con portata al 50%
- OAC/SAcurtain con portata al 100%
- TB no curtain
- OAC/SA no curtain con portata naturale
- OAC/SA/no curtain con portata al 50%
- OAC/SA no curtain con portata al 100%

# 5.4 Impostazione delle due strategie di controllo

Il futuro dell'edilizia si sta dirigendo sempre di più verso soluzione tecnologiche dinamiche, per la realizzazione degli edifici, che permettano di adattarsi alle condizioni climatiche per essere più efficienti possibili. Per questo motivo, l'implementazione delle strategie di controllo diventa fondamentale per poter attuare ciò.

Le più utilizzate per il controllo delle DSF sono di tipo Rule Based, ovvero vengono stabilite una successione di regole nella forma "if condition, then action", riguardanti determinati parametri climatici.

Ma esistono delle strategie di controllo più avanzate, come ad esempio il Model Based, già accennato nel paragrafo 2.5.

Riguardo al caso studio si sono impostate due strategie: una di tipo rule based e una di tipo model based.

# 5.4.1 Controllo 1: Rule based

Si è stabilito due differenti controlli di tipo rule based, i quali vengono eseguiti contemporaneamente. Il primo legato al controllo della ventilazione all'interno della cella, impostando, a seconda dei valori limite, una determinata velocità. Il secondo relativo allo stato della tenda. In quest'ultimo caso non è stato possibile valutare una soluzione intermedia in quanto il programma e il controllo della schermatura scelto non permetteva tale scelta.

I parametri di controllo sono principalmente la radiazione solare incidente, la temperatura esterna e la differenza di tempetura tra ambiente esterno e ambiente interno.

Nella figura sottostante è possibile vedere l'albero decisionale che si è impostato e i valori limiti per ogni parametro, che successivamente saranno variati.

Sono riportate tre differenti velocità: per la ventilazione naturale, per la ventilazione forzata, e la velocità al 50% che è stata calcolata facendo la media tra le due precedenti.



Figura 84 - Strategia di controllo rule based

#### 5.4.1.1 Simulazione parametrica

Si è scelto di utilizzare anche in questo caso la simulazione parametrica per poter vagliare diverse combinazioni in modo da poter ottenere i valori ottimali e, inoltre, poter fare delle considerazioni sui vari parametri andando così a definire i più significativi.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i range di variazione di ogni parametro che sono stati presi in esame. Con l'ausilio di Matlab è stato possibile automatizzare il processo di combinazione dei vari parametri ottenendo 1500 combinazioni differenti. Nonostante l'automazione del processo garantisca notevoli benefici, il costo computazionale per poter effettuare tutte le simulazioni è elevato.

		1	2	3	4	5
Α	Qsol	100	150	200		
В	Tout	2	4	8	12	16
С	Qsol	400	500	600	700	800
D	Tout-Tin	2	4	8	12	16
Ε	Qsol	100	200	300	400	

Tabella 19 - Tabella riassuntiva dei coefficienti

### 5.4.1.2 Analisi degli output – parametri di prestazione

I parametri presi in considerazione per valutare la DSF sono due:

- Fabbisogno di energia primaria
- Useful Daylight Illuminance (UDI)

È importante ricordare che le simulazioni sono annuali e per calcolare l'UDI si è considerato solo i giorni di occupazione, quindi, sono stati esclusi i fine settimana e le ore al di fuori dell'orario lavorativo. Invece, per il fabbisogno è stato effettuato un calcolo annuale considerando ogni singolo giorno.

Il criterio per valutare la combinazione ottimale è stato quello di prendere il massimo valore di UDI Autonomus + UDI Supplementary, e successivamente in base alle varie configurazioni che si ottengono si sceglie quella con il minimo fabbisogno.

# OUTDOOR AIR CURTAIN:

Le combinazioni ottimali seguendo il criterio descritto in precedenza sono tre (CONF A B C D E):

- OAC\_100\_2\_800\_4\_400
- OAC\_150\_2\_800\_4\_400
- OAC\_200\_2\_800\_4\_400

Da questa prima analisi si può notare come il parametro A risulti poco significativo, nel controllo Rule Based, per ottenere la combinazione ottimale, in quanto risulta l'unico che varia, ma i valori di UDI e fabbisogno sono uguali per tutte e tre le combinazioni. I grafici sottostanti mostrano con evidenza quanto appena scritto. I parametri fondamentali risultano essere B, legato alla temperatura esterna e il parametro E, legato al controllo della tenda.



Figura 85 - Qheat\_Qcool\_CONF OAC

La configurazione ottimale si attesta ad un valore di Q heat pari a 13 kWh/m<sup>2</sup>, un valore di Q cool pari a 231 kWh/m<sup>2</sup> e per il Q ill 133 kWh/m<sup>2</sup>.

Si nota che B presenta per ogni valore un andamento lineare, e all'aumentare di questo valore diminuisce il fabbisogno di energia per il riscaldamento. Il parametro E, invece, influenza maggiormente il parametro UDI, perché è il parametro che gestisce lo stato della schermatura. Per quanto riguarda il fabbisogno di heating e cooling, si nota un andamento iperbolico per ogni valore, e all'aumentare del valore si nota un aumento del fabbisogno di raffrescamento con una incremento tra un valore e l'altro che aumenta. Invece per il riscaldamento all'aumentare del valore diminuisce i fabbisogno.

I parametri ottimali per la configurazione OAC sono:

A	100
В	2
С	800
D	4
E	400

Tabella 20 - Parametri ottimali per OAC



Figura 86 - Schema finale Rule Based\_OAC

### <u>SUPPLY AIR</u>

Le combinazioni ottimali seguendo il criterio descritto in precedenza sono tre (CONF\_A\_B\_C\_D\_E):

- OAC 100 12 800 8 400
- OAC\_150\_12\_800\_8\_400
- OAC 200 12 800 8 400

Anche in questo caso si evince che il parametro A risulta essere poco significativo.



Figura 87 - Qheat\_Qcool\_CONF SA

La configurazione ottimale si attesta ad un valore di Q heat pari a 21 kW/m<sup>2</sup>, di Q cool pari a 233 kW/m<sup>2</sup> e di Qill 133 kW/m<sup>2</sup>.

Nella configurazione Supply Air, si nota dai grafici che quelli che producono una variazione maggiore nel comportamento della DSF sono il parametro B e il parametro E. Inoltre, è presente una maggiore dispersione dei punti per ogni valore del parametro analizzato. Per quanto riguarda il parametro B si nota che, al crescere del valore, si va verso un minor consumo di energia per il riscaldamento, ma un maggiore consumo per il raffrescamento. Il parametro E invece, presenta un andamento iperbolico per ogni valore, ma variando il valore non si nota una significativa riduzione del fabbisogno di riscaldamento come è più evidente in B.

I parametri ottimali per la configurazione SA sono:

A	100
В	12
С	800
D	8
E	400

Tabella 21 - parametri ottimali per SA



Figura 88 - Schema finale Rule Based \_SA

# 5.4.2 Controllo 2: Model Based

Tale controllo è definito Model Based, in quanto, sfrutta le proprietà predittive delle configurazioni analizzate per scegliere quella ottimale.

Per poterlo impostare, è stato necessario definire due criteri:

- 1. Massimizzazione della luce diurna
- 2. Riduzione del fabbisogno di energia

Il primo passo per poter definire tale controllo è stato quello di effettuare le simulazioni di ogni configurazione (stato della tenda e tipo di ventilazione) in OAC o SA. Successivamente, si è andati a confrontare, per ogni timestep, le varie configurazioni e si è scelta quella che rispetta entrambi i criteri enunciati precedentemente.

Lo scopo del primo criterio è quello di massimizzare l'utilizzo della luce diurna garantendo il comfort visivo. Il parametro di riferimento è *l'illuminamento nel punto misurato*: se esso è maggiore di 3000 lux vengono considerate solo le configurazioni con la tenda, se invece è minore di 3000 lux vengono considerate sia le configurazioni con la tenda che senza. Successivamente, tra le configurazioni rimanenti viene effettuata un'ulteriore selezione ovvero vengono scelte solamente le configurazioni aventi la maggiore somma dei fattori UDI autonomus e UDI supplementary.

Il secondo criterio ha il compito di scegliere, tra le configurazioni che soddisfano il primo criterio, la configurazione che fornisce il minor fabbisogno energetico.

Definita la soluzione ottimale per ogni timestep, sono state formate due schedule, che saranno implementate su Energy Plus attraverso EMS, di cui, una andrà a definire il tipo di ventilazione all'interno della cavità e l'altra definirà lo stato della tenda, (alzata/abbassata). Infine, le due schedule sono utilizzate per la simulazione annuale con il controllo Model Based e confrontate con le altre strategie di controllo.

# 5.5 Considerazioni finali

In questo paragrafo vengono confrontati le due configurazioni di DSF (OAC E SA), controllate con le due diverse strategie di controllo sopra descritte (Rule Base, Model Based e i benchmark) per poter dimostrare che tali strategie producano dei risvolti positivi Di seguito, si riporta il confronto rispetto alla configurazione OAC.



Figura 89 – FABBISOGNO\_confronto con i benchmark\_CONF OAC



Figura 90 - UDI\_Confronto Benchmark\_CONF. OAC

Si evince dai grafici sovrastanti che le configurazioni con l'implementazione del controllo dinamico, sia nel caso del rule based che in quello model based, generano una riduzione del fabbisogno energetico, e massimizzano, rispetto ai benchmark, l'UDI Autonomus permettendo così di garantire il comfort visivo e limitando l'uso dell'impianto di illuminazione. Infatti, l'UDI Fell Short risulta molto più basso nei due modelli rispetto al modello statico di simulazione annuale (OAC\_CURT). Tale risultato è indicativo di quanto sia importante e innovativo che le componenti costituenti un edificio siano adattabili alle condizioni atmosferiche, e che siano gestite da un sistema di controllo che permetta di valutare la situazione ottimale rispetto ai componenti statici, che fino ad ora costituiscono la maggior parte del patrimonio edilizio mondiale.

Di seguito, si riporta il grafico della percentuale di utilizzo delle varie configurazioni nel controllo rule Based, da cui si riscontra che la configurazione prevalente all'interno della simulazione annuale risulta essere OAC con ventilazione naturale senza tenda. Invece la configurazione con la velocita del flusso garantita al 100% dall' impianto, è quasi nulla.



Figura 91 – Grafico della percentuale di utilizzo – OAC Rule Based



Figura 92 - Percentuale di utilizzo- OAC Model Based

Nella figura 92, possiamo invece analizzare la percentuale di utilizzo per il controllo Model Based. In questo caso la configurazione prevalente risulta essere il Thermal Buffer con la tenda. La differenza tra la configurazione prevalente tra il Rule Based e il Model Based è dovuta al criterio con cui si imposta il modello. In quanto, nella prima strategia si vanno ad impostare delle regole legate alle condizioni climatiche a cui corrisponde una determinata configurazione, e solo successivamente si sceglie quella con il fabbisogno annuale minimo. Nella seconda strategia, invece, si va a scegliere la configurazione ottimale, ovvero il minimo del fabbisogno, rispetto alle varie configurazioni prese in esame per ogni timestep; ed essendo la configurazione Thermal Buffer più "isolante" dal punto di vista energetico, è probabile che essa prevalga sulle altre in una simulazione annuale.

#### SUPPLY AIR



Di seguito, si riporta il confronto rispetto alla configurazione SA.

Figura 93 – FABBISOGNO\_confronto con i benchmark\_CONF SA



Figura 94 - UDI\_Confronto Benchmark\_CONF. SA

Essendo il valore di E uguale per la configurazione OAC e SA, il grafico relativo al Useful Daylight Illuminance è identico, quindi valgono le stesse considerazioni. Invece per quanto riguarda il grafico del fabbisogno notiamo che, anche in questo caso, attuare una strategia di controllo all'interno della facciata doppia pelle produce dei benefici in termini energetici. Inoltre, in questo caso specifico, notiamo una analogia tra il modello in Thermal Buffer e i modelli con l'implementazione del controllo, sintomo che probabilmente la configurazione in TB è quella che è prevalente nella simulazione annuale. Si nota soprattutto che il fabbisogno di energia per il riscaldamento è molto basso per entrambi. Questo potrebbe essere dovuto alla ventilazione del SA, la quale immettendo nell' ambiente dell'aria esterna, avente una temperatura inferiore rispetto alla temperatura interna (soprattutto in inverno), produce una perdita di calore compensata dall'impianto di climatizzazione. Per questo motivo, avendo scelto come configurazione ottimale quella che fornisce il minor fabbisogno energetico, è molto probabile che sia la Thermal Buffer, poiché non essendoci un flusso d'aria entrante l'impianto non fornisce energia extra. Ciò è possibile notarlo nel grafico sottostante, che riporta la percentuale di "utilizzo" di una configurazione rispetto ad un'altra.



Figura 95- Grafico della percentuale di utilizzo - SA



Figura 96 - Grafico della percentuale di utilizzo - SA Model Based

In questo caso, rispetto all'OAC, in entrambi i modelli prevale la configurazione in Thermal Buffer, probabilmente per la ragione descritta in precedenza, ossia che il supply air immette aria all'interno quindi nella stagione invernale e soprattutto di notte, viene preferito il TB.

Infine, si sono confrontati i modelli con le due strategie di controllo in OAC e quelli in SA, per provare a definire quale sia la configurazione ottimale, in una località come Torino.



Figura 97 - Confronto OAC – SA

Si evince dal grafico, che non c'è una configurazione che sia migliore rispetto ad un'altra, però analizzando i soli valori, quella che risulta essere leggermente più efficiente è il SA Model Based, soprattutto per quanto riguarda il fabbisogno di raffrescamento.



Figura 98 - confronto UDI configurazioni OAC\_SA

Inoltre, confrontando i grafici dell'UDI, si nota che le due configurazione in Rule Based sono identiche, in quanto il parametro E della configurazione ottimale di entrambi, era lo stesso. Nel caso del Model based, si nota una piccola differenza nella percentuale dell'UDI Autonomus, anche se poco significativa. Ciò può essere dovuto al controllo della schermatura, implementato su Energy Plus. Tale controllo può configurare lo stato della tenda solamente in due modi (alzata o abbassata). Per tale ragione non si evidenzia una differenza notevole tra i vari grafici che, invece, si potrebbe avere nel caso in cui al posto della tenda ci fosse stata una veneziana, nella quale sarebbe stato possibile implementare il controllo dell'angolazione delle lamelle.
## 6. CONCLUSIONI

L'obbiettivo della tesi è stato quello di modellare il comportamento di una facciata doppia pelle, e cercare di parametrizzare la simulazione della stessa, in modo tale da poter analizzare tutte le configurazioni in modo automatico; successivamente si è validato il modello in modo tale da poter individuare delle strategie di controllo dinamico, che permettano alla facciata di garantire degli elevati standard di efficienza e di comfort indoor. Oltre a definire un modello, che permette di analizzare le prestazioni reali della cella, l'innovazione sta nel metodo di lavoro che si è utilizzato per la tesi, ovvero l'utilizzo del software Matlab. Tale software ha permesso di rendere l'intero processo (dalla simulazione alla implementazione del controllo) automatico, di velocizzare i tempi di analisi e soprattutto di vagliare diverse soluzioni e casistiche .

La DSF è stata installata sulla facciata a Sud della cella situata sul tetto del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino, e l'osservazione sperimentale della cella ha permesso di quantificare le proprietà termofisiche della doppia pelle, ma soprattutto di validare il modello simulato permettendo così di stimare le prestazioni energetiche reali della cella.

Anche per il processo di calibrazione si è utilizzato un approccio parametrico, che ha permesso di renderlo più duttile e versatile. In quanto è stato possibile valutare una notevole quantità di combinazioni dei vari parametri, caratterizzanti la cella. Ottenendo un modello che descrivesse correttamente il comportamento reale della cella e che minimizzasse la differenza tra i parametri simulati e quelli misurati.

Una volta validato il modello, si è implementato il controllo attraverso due tipi di strategie: Rule Based e Model Based. Anche in questo caso, attraverso l'approccio parametrico è stato possibile vagliare una moltitudine di casistiche nel caso della strategia Rule Based.

Infine, i risultati delle simulazioni delle diverse strategie di controllo sono stati confrontati con i benchmark. Tale confronto ha evidenziato che l'implementazione del controllo all'interno di un componente vetrato, come una DSF, risulta molto utile, in quanto permette alla facciata di comportarsi in modo flessibile rispetto alle condizioni al contorno (come, ad esempio, le condizioni metereologiche). Infatti, analizzando i grafici si rileva nei modelli "dinamici" una riduzione del fabbisogno energetico del 20% fino a picchi del 40% rispetto alle configurazioni statiche analizzate. Inoltre, tali strategie hanno permesso di massimizzare il contributo della luce solare, riducendo il consumo elettrico per garantire un certo livello di illuminamento all'interno dell'ambiente. Analizzando il Rule Based, si è visto che i parametri più significativi per il controllo

99

della portata all'interno della cavità sono legati alle temperature. Invece, il parametro della radiazione solare non produce notevoli cambiamenti.

Nonostante le potenzialità evidenziate da questo lavoro di tesi, sono presenti anche delle limitazioni. La prima di queste è il modello di Energy Plus che si è scelto per modellare la facciata doppia pelle, in quanto essa non permette di configurare la DSF con una portata di ventilazione naturale.

Inoltre, il software Energy Plus non permette la variazione delle configurazioni della DSF in modo dinamico ma analizza una configurazione per volta, per tale ragione si è proceduto alla creazione di dieci file idf diversi per ogni configurazione. Una seconda limitazione si è verificata durante il processo di calibrazione, mentre si analizzava la temperatura superficiale dei vetri costituenti la DSF. I picchi notturni non coincidevano con quelli misurati, situazione ancora più evidente nelle configurazioni ventilate. Questo è stato riscontrato anche nei risultati emersi nell' articolo [10], e può essere dovuto al fatto che in Energy Plus non è possibile implementare l'inerzia termica delle componenti vetrate. Per tale motivo, il calore assorbito durante il giorno viene rilasciato completamente producendo una temperatura più bassa a quella misurata realmente durante le ore notturne.

Le possibili evoluzioni di questo lavoro di tesi possono essere l'utilizzo del modello per un'ulteriore analisi di tipo prestazionale della facciata, come riportato nell'articolo[11], l'implementazione di altre tipologie di strategie di controllo, ed infine, la realizzazione di controlli in real-time attraverso l'utilizzo di un sistema "Internet of things" in grado di acquisire le misure necessarie al modello, predire le condizioni future e impostare la configurazione ottimale per la DSF.

## 7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] European Parliament and Council. Directive 2010/31 EU Recast on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union.
  [1] O. J. of the E. Union, "Directive 2010/31/EU," Off. J. Eur. Union, vol. L153/13, no. 18.6.2010, pp. 13–35, 2010.
- [2] B. Å. Schiefer Christian, Heimrath Richard, Hengsberger Herwig, Mach Thomas, Streicher Wolfgang, Santamouris Matheos, Farou Ifigenia, Erhorn Hans, Erhorn-Kluttig Heike, Matos Mario de, Duarte Rogerio, "Best Practice for Double Skin Façades WP 1 Report ' State of the Art, '" p. 151, 2005, [Online]. Available: http://www.bestfacade.com/pdf/downloads/Bestfacade\_WP1\_Report.pdf.
- [3] H. Poirazis, Double Skin Façades for Office Buildings. 2004.
- [4] G. Chaudhary, "Decoupling the thermal and visual performance in glazing systems : a novel methodology for the numerical investigation of the case of double skin facade systems .," no. June, 2019.
- [5] A. Nabil and J. Mardaljevic, "Useful daylight illuminances : A replacement for daylight factors," vol. 38, pp. 905–913, 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.013.
- [6] G. Gennaro, "Strategie di controllo avanzate di vetri elettrocromici per il risparmio energetico negli edifici: caratterizzazione sperimentale e analisi numeriche," p. 157, 2019.
- US Department of Energy, "EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations," US Dep. Energy, no. c, pp. 1–847, 2010, [Online].
   Available: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EnergyPlus+En gineering+Reference,+The+Reference+to+EnergyPlus+Calculations#1.
- [8] Alessandra Sabot, "VALIDAZIONE EMPIRICA DEL MODELLO DEL MOCK-UP DELLA NUOVA SEDE REGIONE PIEMONTE," 2012.
- [9] D. Pepe, "Controllo dinamico della radiazione solare con smart glazing per il comfort termico ambientale: caratterizzazione sperimentale e analisi

numeriche.," *Webthesis.Biblio.Polito.It*, pp. 1–164, 2007, [Online]. Available: https://webthesis.biblio.polito.it/11806/1/tesi.pdf.

- [10] A. Gelesz, E. Catto Lucchino, F. Goia, V. Serra, and A. Reith, "Characteristics that matter in a climate façade: A sensitivity analysis with building energy simulation tools," *Energy Build.*, vol. 229, p. 110467, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110467.
- [11] Gennaro G., Goia F., De Michele G., Perino M. and Favoino F. Embedded singleboard controller by dynamic transparent facades: a co-simulation virtual testbed. Accepted in the Proceeding of BS2021 Conference, 1-3 September 2021. Bruges, Belgium.
- [12] <u>https://www.ingenio-web.it/5559-la-calibrazione-dei-modelli-di-simulazione-</u> energetica-un-caso-studio