POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Edile/Architettura

Laurea Magistrale – Ingegneria dei Sistemi Edilizi

OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA TRAMITE SOLUZIONI DI INVOLUCRO E SISTEMI DI OSCURAMENTO DI UN EDIFICIO RIQUALIFICATO AD USO UFFICI SITO IN AZERBAIGIAN

Relatore: Prof. Arch. Tiziana Poli

Tesi di Laurea Magistrale:

Patrick GERVACIO

Matricola: 823652

Anno accademco2015/2016

INDICE

ABSTRACT (EN) 1
ABSTRACT (IT) 2
1. INTRODUZIONE 3
2. IL CONTESTO DI RIFERIMENTO 4
3. IL RECUPERO DI UN EDIFICIO MULTIFUNZIONALE 8
3.1. DESCRIZIONE CONTESTO FISICO 8
3.2. CONTESTO CLIMATICO 10
3.3. LE CONDIZIONI E LO STATO DI DEGRADO 11
3.4. GLI OBIETTIVI DI PROGETTO 17
3.4.1 GLI OBIETTIVI FUNZIONALI/SPAZIALI 17
3.4.2 GLI OBIETTIVI PRESTAZIONALI 19
4. GLI STRUMENTI DI ANALISI 20
5. IPOTESI E DATI D'INGRESSO 22
5.1. MODELLAZIONE 24
6. ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE 27
6.1. INTRODUZIONE 27
6.2. PROGRESSIONE A CASCATA DEL PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE 27
6.2.1. VARIAZIONE TRASMITTANZA SUPERFICI OPACHE Uop 31
6.2.2. VARIAZIONE TRASMITTANZA SUPERFICI VETRATE Uw 32
6.2.3. VARIAZIONE TRASMITTANZA SOLARE g 35
6.2.4. VARIAZIONE SUPERFICIE VETRATA (%Af) 42
6.2.5. VERIFICHE DI ILLUMINAMENTO 46
7. ANALISI SISTEMI DI OSCURAMENTO 52
7.1. LAMELLE 53
7.1.1. VARIAZIONE RIFLETTANZA E INCLINAZIONE LAMELLE 53
7.1.2. ANALISI FABBISOGNI ESTIVI E INVERNALI 56
7.1.3. ANALISI ILLUMINAMENTO E ABBAGLIAMENTO 57

7.2. TENDE 58
7.2.1. VARIAZIONE TRASMITTANZA E RIFLETTANZA ENERGETICA E VISIBILE 58
7.2.2. ANALISI FABBISOGNI ESTIVI E INVERNALI 58
7.2.3. ANALISI ILLUMINAMENTO E ABBAGLIAMENTO 59
7.3. RETI A MAGLIE METALLICHE 61
7.3.1. ANALISI FABBISOGNI ESTIVI E INVERNALI 61
7.4. CONSIDERAZIONI E TERMINI DI CONFRONTO 61
8. IL PROGETTO DI SISTEMA A LAMELLE 62
8.1. INTRODUZIONE 66
8.2. LISTELLI 66
8.3. LAMELLE ORIZZONTALI 67
8.4. LAMELLE VERTICALI 68
8.5. CONFRONTO SOLUZIONI 70
8.5.1. CONFRONTO FABBISOGNI ESTIVI ED INVERNALI 70
8.5.2. CONFRONTO VALORI DI ILLUMINAMENTO 73
8.6. VARIAZIONE TRASMISSIONE LUMINOSA 75
8.7. ANALISI APPORTI SOLARI IN BASE A RAPPORTO LARGHEZZA LAMELLA E PASSO (% d/p) 81
8.8. CONSIDERAZIONI SULLA PERCEZIONE VISIVA DEI SISTEMI DI OSCURAMENTO 83
9. CONCLUSIONI 86
9.1. SOLUZIONI GENERALI SUI SISTEMI DI CONTROLLO 86
9.2. CONFIGURAZIONE E SISTEMA DI OSCURAMENTO ADOTTATO 88
9.3. POSSIBILI RISVOLTI FUTURI 91
ALLEGATI 92
BIBLIOGRAFIA 105

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 6.2.1 - Fabbisogni estivi e invernali, variazione trasmittanza parti opache 31
Grafico 6.2.2 - Fabbisogni estivi e invernali, variazione trasmittanza superfici trasparenti 33
Grafico 6.2.3 - Fabbisogni invernali al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4W/m^{2}K) 35
Grafico 6.2.4 - Fabbisogni estivi al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m^{2}K) 36

Grafico 6.2.5 - Fabbisogni invernali al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m^{2}K) 37
Grafico 6.2.6 - Fabbisogni estivi al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m^{2}K) 38
Grafico 6.2.7 - Fabbisogni invernali al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m^{2}K) 39
Grafico 6.2.8 - Fabbisogni estivi al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m^{2}K) 40
Grafico 6.2.9 - Fabbisogno invernale con variazione superficie vetrata (Uop=0.4 W/m^{2}K, Uw=1.5 W/m^{2}K)..... 43
Grafico 6.2.10 - Fabbisogno estivo con variazione superficie vetrata (Uop=0.4 W/m^{2}K, Uw=1.5 W/m^{2}K)..... 43
Grafico 6.2.11 - Fabbisogno invernale con variazione superficie vetrata (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K)..... 44
Grafico 6.2.12 - Fabbisogno estivo con variazione superficie vetrata (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K)..... 45
Grafico 6.2.13 - Valori di illuminamento (lux) con Af=25% 48
Grafico 6.2.14 - Valori di illuminamento (lux) con Af=50% 49
Grafico 6.2.15 - Valori di illuminamento (lux) con Af=80% 50
Grafico 7.1.1 - Illuminamento (lux) soluzione a lamelle 57
Grafico 7.2.1 - Illuminamento con sistema di oscuramento tramite tende esterne 60
Grafico 8.5.1 - Valori di illuminamento sistema a listelli 73
Grafico 8.5.2 - Valori di illuminamento sistema a lamelle..... 74
Grafico 8.5.3 - Valori di illuminamento sistema a lamelle verticali 74
Grafico 8.6.1 - Illuminamento con sistema di oscuramento a listelli opachi 77
Grafico 8.6.2 - Illuminamento con sistema di oscuramento a listelli traslucidi 78
Grafico 8.6.3 - illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle orizzontali opache..... 78
Grafico 8.6.4 - Illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle orizzontali traslucide..... 79
Grafico 8.6.5 - Illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle verticali opache 79
Grafico 8.6.6 - Illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle verticali traslucide 80
Grafico 8.7.1 - Variazione apporti solari configurazione a listelli orizzontali 82
Grafico 8.7.2 - Variazione apporti solari configurazione a lamelle..... 82

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.3.1 - Elenco serramenti stato di fatto corpo basso (B)..... 16
Tabella 3.3.2 - Quantità superfici corpo basso (B) 16
Tabella 3.3.3 – Elenco serramenti stato di fatto corpo alto (A)..... 17
Tabella 3.3.4 – Quantità superfici corpo alto (A) 17
Tabella 3.4.1- Stratigrafia e trasmittanza chiusura orizzontale superiore 22
Tabella 3.4.2 - Stratigrafia e trasmittanza chiusura orizzontale inferiore 23
Tabella 3.4.3 - Stratigrafia e trasmittanza chiusura verticale portante 23
Tabella 3.4.4 - Stratigrafia e trasmittanza chiusura verticale di tamponamento 23
Tabella 5.1.1 - Condizioni di progetto ipotizzate..... 26

Tabella 5.1.2- Fabbisogno stato di fatto 26
Tabella 6.2.1 - Trasmittanze termiche considerate per l'ottimizzazione degli elementi opachi..... 28
Tabella 6.2.2 - Trasmittanze termiche considerate per l'ottimizzazione dei serramenti 28
Tabella 6.2.3 - Valori di g considerati nel processo di ottimizzazione 29
Tabella 6.2.4 - Percentuali di superficie trasparente considerate nel processo di ottimizzazione 29
Tabella 6.2.5 - Casistiche considerate per le lamelle di oscuramento..... 30
Tabella 6.2.6 - Casistiche considerate per le tende di oscuramento 30
Tabella 6.2.7 - Casistica considerata per lo schermo di oscuramento 30
Tabella 6.2.8 - Fabbisogni estivi e invernali, variazione trasmittanza parti opache 31
Tabella 6.2.9 - Fabbisogni estivi e invernali Uop=0.4 W/m^{2}K con variazione trasmittanza superfici trasparenti 33
Tabella 6.2.10 - Fabbisogni estivi e invernali Uop=0.3 W/m^{2}K con variazione trasmittanza superfici trasparenti 34
Tabella 6.2.11 - Fabbisogni estivi e invernali Uop=0.2 W/m^{2}K con variazione trasmittanza superfici trasparenti 34
Tabella 6.2.12 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=1.5 W/m^{2}K) 36
Tabella 6.2.13 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=1.3 W/m^{2}K) 36
Tabella 6.2.14 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=1.1 W/m^{2}K) 37
Tabella 6.2.15 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=0.9 W/m^{2}K) 37
Tabella 6.2.16- Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=1.5 W/m^{2}K) 38
Tabella 6.2.17 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=1.3 W/m^{2}K) 38
Tabella 6.2.18 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=1.1 W/m^{2}K) 39
Tabella 6.2.19 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K) 39
Tabella 6.2.20 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m^{2}K, Uw=1.5 W/m^{2}K) 40
Tabella 6.2.21 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m^{2}K, Uw=1.3 W/m^{2}K) 40
Tabella 6.2.22 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m^{2}K, Uw=1.1 W/m^{2}K) 41
Tabella 6.2.23 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K) 41
Tabella 6.2.24 - Variazione percentuale superficie vetrata (Uop=0.4 W/m^{2}K, Uw=1.5 W/m^{2}K)..... 44
Tabella 6.2.25 - Variazione percentuale superficie vetrata (Uop=0.4 W/m^{2}K, Uw=1.5 W/m^{2}K)..... 45
Tabella 6.2.26 - Illuminamento Af=25% 48

Tabella 6.2.27 - Illuminamento Af=50% 49
Tabella 6.2.28 - Illuminamento Af=80% 51
Tabella 6.2.29 - Condizioni per calcolo di illuminamento delle configurazioni di percentuale vetrata 51
Tabella 6.2.1 - Condizioni di partenza per l'ottimizzazione tramite schermature 52
Tabella 7.1.1 - Variazione di riflettanza lamelle stagione invernale 53
Tabella 7.1.2 – Variazione di riflettanza lamelle stagione estiva 54
Tabella 7.1.3 – Fabbisogni invernali in funzione dell'inclinazione delle lamelle (larghezza lamelle d=5 cm) 55
Tabella 7.1.4 - Fabbisogno estivo in funzione dell'inclinazione delle lamelle (larghezza lamelle d=5 cm) 56
Tabella 7.1.5 - Fabbisogni con sistema a lamelle bassa riflettanza (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K, g=0.3) 56
Tabella 7.1.6 - Indici di abbagliamento con il sistema a lamelle 57
Tabella 7.2.1 - tipologie tende analizzate 58
Tabella 7.2.2 - Fabbisogni con sistema di oscuramento tramite differenti tende 59
Tabella 7.2.3 - Indici di abbagliamento con oscuramento tramite tende 60
Tabella 7.3.1 - Fabbisogni con oscuramento tramite rete a maglia metallica 61
Tabella 7.4.1- Variazioni fabbisogni in funzione del passo delle lamelle 63
Tabella 7.4.2 - Variazione fabbisogni in funzione della larghezza delle lamelle (passo 10 cm) 64
Tabella 7.4.3 - Variazione fabbisogni in funzione della larghezza delle lamelle (passo 15 cm) 64
Tabella 7.4.4 - Variazione fabbisogni in funzione della larghezza delle lamelle (passo 20) 64
Tabella 7.4.5 - Variazione fabbisogni in funzione dello spessore delle lamelle 65
Tabella 7.4.6 - Variazione fabbisogni in funzione dell'angolo delle lamelle (g=0.6) 65
Tabella 7.4.7 - Variazione fabbisogni in funzione dell'angolo delle lamelle (g=0.3) 65
Tabella 8.2.1 - parametri listelli 67
Tabella 8.3.1 - parametri lamelle orizzontali 68
Tabella 8.4.1 – parametri lamelle verticali 69
Tabella 8.5.1 - Fabbisogni sistema a listelli 71
Tabella 8.5.2 - Fabbisogni sistema a lamelle orizzontali 72
Tabella 8.5.3 - Fabbisogni sistema a lamelle verticali 72
Tabella 8.6.1- Parametri radiativi e ottici dei sistemi di oscuramento analizzati 76

INDICE DELLE IMMAGINI

Fig. 2.1 - "The Flame Towers" a Baku – Dia holding, http://www.diainsaat.com/ (ultimo accesso: Settembre 2016) 6
Fig. 2.2 - White City Office Building, http://en.president.az/ (ultimo accesso: settembre 2016) 7
Fig. 3.1 - Inquadramento 8
Fig. 3.2 - Andamento delle temperature e delle precipitazioni a Baku 11
Fig. 3.3 - Facciata Sud, ingresso principale 12
Fig. 3.4 - Vista Umana facciata Sud-Est 12

Fig. 3.5 - Planimetria generale 14
Fig. 3.6 - Pianta piano terra 14
Fig. 3.7 - Pianta piano primo 15
Fig. 3.8 - Pianta piano secondo 15
Fig. 3.9 - Pianta piano terzo 16
Fig. 3.10 - Relazioni tra principi ambientali , economici e sociali nella progettazione di un edificio per uffici sostenibile (US EPA 2010) 18
Fig. 4.1 - Interfaccia software EnergyPlus 21
Fig. 5.1 - Valori tabellati di trasmittanza dei serramenti (UNI 11300-1) 24
Fig. 5.2 - Valori di $g_{gl,n}$ (UNI 11300-1) 24
Fig. 5.3 - Modello geometrico 26
Fig. 6.1 - Valori raccomandati di massimo valore di indice di abbagliamento (DGI- Discomfort Glare Index) 47
Fig. 7.1 - Modello energetico tramite OpenStudio (Af=80%) 52
Fig. 8.1 - Esempio sistema Brise-soleil (http://www.solarbeamz.uk/) 66
Fig. 8.2 - Rappresentazione simbolica listelli 67
Fig. 8.3 - Raprresentazione simbolica lamelle orizzontali 68
Fig. 8.4 - Esempio di sistema di oscuramento a lamelle verticali (http://www.archiexpo.com/) 69
Fig. 8.5 - Raprresentazione simbolica lamelle verticali 69
Fig. 8.6 - Stralcio sistema di oscuramento a listelli 71
Fig. 8.7 - Stralcio sistema di oscuramento a lamelle orizzontali 71
Fig. 8.8 - Stralcio sistema di oscuramento a lamelle verticali 72
Fig. 8.9 - Esempio di sistema di oscuramento a lamelle verticali trasparenti – Novartis Pharmaceutical Corporation, Building 337 (http://vinoly.com/) 76
Fig. 8.10 - White City, Central Business District, studio Atkins (http://www.atkinsglobal.com/) 81
Fig. 8.11 - Visuale interna con sistema di oscuramento a listelli 84
Fig. 8.12 - Visuale esterna con sistema di oscuramento a lamelle orizzontali traslucide 84
Fig. 8.13 - Visuale esterna con sistema di oscuramento a lamelle verticali traslucide 85

ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION OF A RENOVATED OFFICE BUILDING IN AZERBAIJAN THROUGH ENVELOPE AND SHADING DEVICES' SOLUTIONS

Author: Patrick Gervacio

Supervisor: Prof. Arch. Tiziana Poli

Key words: *Energy efficiency, EnergyPlus, Envelope performance, Shading devices, Human comfort*

ABSTRACT (EN)

The aim of the thesis consist in evaluating different strategies for a functional renovation of a building through a parametric approach, to obtain energy performance improvements through analysis based on envelope behaviour and its shading devices, ensuring meanwhile users' visual and thermal comfort.

The obtainment of low energy consumptions and the correct use of solar gains were fundamental parts of the thesis work, based on a sustainable type of design.

An energetic model was created and imported in EnergyPlus software, where information has been extrapolated from, evaluating heating and cooling requirements coupled with comfort control of natural lighting levels, glare control and visual perception from internal rooms.

The simulation process guaranteed by EnergyPlus allowed to make modifications on opaque and transparent envelope's transmittances, on solar factors and on window to wall ratios, enabling the user to assess different types of shading devices, maintaining adequate values of illumination in a typical office activity.

The results are presented using data simulation analysis, combined in conclusion with some considerations about practical issues like maintenance, cleaning matters and substitution of parts of the envelope, in order to have a global vision based not only on physical evaluations but also on construction feasibility.

OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA TRAMITE SOLUZIONI DI INVOLUCRO E SISTEMI DI OSCURAMENTO DI UN EDIFICIO RIQUALIFICATO AD USO UFFICI SITO IN AZERBAIGIAN

Autore: Patrick Gervacio

Relatore: Prof. Arch. Tiziana Poli

Parole chiave: *Efficienza energetica, EnergyPlus, Prestazioni d'involucro, Sistemi di oscuramento, benessere umano*

ABSTRACT (IT)

L'obiettivo della tesi è quello di indagare tramite un approccio di tipo parametrico le strategie ottimali per un edificio ridestinato a nuova funzione, intervenendo sul miglioramento delle prestazioni energetiche attraverso la gestione e l'analisi del comportamento d'involucro e dei relativi dispositivi di controllo solare; questo processo di svolgimento verte a raggiungere di pari passo condizioni di benessere termico e visivo degli utenti.

L'importanza di ottenere ridotti consumi energetici in concomitanza con il corretto utilizzo degli apporti solari è stato posto alla base del lavoro di tesi, seguendo l'impronta di una progettazione sostenibile adatta al contesto climatico su cui si è proceduto con le analisi.

È stato realizzato un modello energetico importato nel software di calcolo EnergyPlus da cui si sono estrapolate le informazioni, valutati i fabbisogni termici estivi ed invernali, i quali sono stati abbinati ad un controllo del comfort da garantire in termini di illuminamento attraverso luce naturale, controllo dell'abbagliamento e percezione visiva dagli ambienti interni.

Lo sviluppo di simulazioni ottenute con l'utilizzo di Energyplus ha permesso di effettuare modifiche sulle trasmittanze di involucro opaco e trasparente, sulla trasmittanza solare e sui valori di percentuale vetrata indagando diverse soluzioni di oscuramento esterno che mantenessero i valori di illuminamento adeguati ad un lavoro tipico da attività di ufficio.

I risultati presentati sono frutto di analisi delle simulazioni effettuate a cui si sono associate in conclusione considerazioni di tipo pratico in termini di facilità di manutenzione, pulizia e sostituzione di elementi di involucro, al fine di avere una visuale complessiva non solo basata su valutazioni fisiche del comportamento dell'edificio ma anche su aspetti di fattibilità materiale di realizzazione.

1. INTRODUZIONE

Oggigiorno è sempre più stringente la necessità di portare l'attenzione mondiale ad un più attento e consapevole controllo dei consumi di energia adibita ai vari ambiti della vita quotidiana.

Uno dei settori su cui si sta puntando molto, cercando di sensibilizzare la popolazione, è proprio il settore edilizio. Questa necessità di riduzione di cui spesso si sente parlare è un atto importante in risposta ai cambiamenti climatici che il pianeta sta subendo nel corso degli anni.

"The atmospheric concentrations of carbon dioxide (CO_2), methane, and nitrous oxide have increased to levels unprecedented in at least the last 800,000 years. CO_2 concentrations have increased by 40% since pre-industrial times, primarily from fossil fuels and secondary from net land use change emissions. […]. Human influence on the climate system is clear. This is evident from the increasing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, positive radiating forcing, observed warming and understanding of the climate system."

(IPCC-Intergovernmental panel on climate change- Headline statement from the summary for policymakers- Climate change 201, the physical science basis.

Risulta quindi sempre più evidente quanto il controllo di questa produzione eccessiva di gas serra possa essere mitigata da una corretta progettazione o riqualificazione di carattere edilizio.

Gli interventi che si possono attuare per un miglioramento delle prestazioni di consumo di un edificio, già ampiamente discussi da molti autori, sono molteplici.
Una di queste soluzioni è uno studio attento delle prestazioni della facciata di involucro, elemento attraverso il quale avvengono i principali scambi termici, le infiltrazioni d'aria, fenomeni di ventilazione, ma è anche il mezzo tramite cui è possibile sfruttare e/o controllare gli apporti solari a proprio favore a seconda delle esigenze stagionali del luogo di inserimento dell'edificio.

Altri benefici che una corretta progettazione dell'involucro edilizio può apportare sono anche il corretto controllo dell'illuminamento naturale degli ambienti interni che portano ad una condizione di comfort interno ed una maggiore vivibilità e produttività di chi vi vive o lavora all'interno.

Diventa quindi necessario avere una visione d'insieme di tutti questi aspetti in modo tale da poter avere una soluzione finale che rispetti le interazioni che si creano tra i parametri coinvolti.

La tesi di seguito esposta si occuperà proprio di questo, servendosi di strumenti informatici specifici di simulazione energetica (EnergyPlus), per osservare tramite un'analisi di tipo parametrico il variare dei vari dati coinvolti all'interno del processo di fabbisogno energetico.

Di seguito verranno effettuate delle analisi inerenti al comportamento energetico del complesso edilizio valutando il contributo di diversi parametri che incidono sul fabbisogno dell'edificio stesso.

Le analisi effettuate sono state eseguite facendo variare singolarmente i vari parametri in un sistema a cascata cercando in tal modo di coprire tutte le combinazioni di variabili adottate.

In particolar modo sono stati fatti variare i seguenti elementi:

- Trasmittanza della superficie opaca;
- Trasmittanza della superficie trasparente;
- Trasmittanza solare del vetro (g);
- Dimensione percentuale dell'area vetrata.

In seguito a questa prima parte di analisi sono state poi effettuate ulteriori analisi per un'ottimizzazione stagionale attraverso la scelta di differenti tipologie di schermature solari.

Questo tipo di approccio serve a dimostrare come l'analisi puntuale delle varie casistiche presentate possa portare ad una scelta più motivata e controllata, senza dare possibiltià di scegliere alternative in modo eccessivamente casuale e aleatorio.

La scelta della soluzione ottimale spetterà poi al progettista, il quale, attraverso i dati in suo possesso, opterà per una alternativa che possa legare insieme buone caratteristiche energetiche, termiche, di illuminamento ma anche scelte di tipo estetico.

L'edificio oggetto delle analisi e ipotesi di seguito esposte è la futura sede principale del "High Tech Park", parco tecnologico sito a Baku, Azerbaigian.

2. IL CONTESTO DI RIFERIMENTO

Baku è la capitale dell'Azerbaigian nonché la più grande città nel territorio del Caucaso.

Per comprendere appieno lo sviluppo della città fino all'attuale conformazione, è necessario indagare sulla storia delle costruzioni in Azerbaigian e nella capitale, estrapolandone gli sviluppi in termini energetici e di volontà di garantire comfort all'interno dell'ambiente costruito.

Nel corso degli anni la città è andata incontro a diverse influenze architettoniche, a causa dell'influsso della cultura sovietica da Est e dalla presenza gradualmente sempre più influente del contesto europeo occidentale.

A partire dagli anni '20, la città è entrata nel periodo del Costruttivismo, nel quale si è vista una standardizzazione nella costruzione di nuovi edifici nell'ottica di una loro funzionalità; l'architetto A. P. Ivanisky ha svolto in questo periodo le ricerche più importanti sull'utilizzo funzionale degli edifici; sono cominciati infatti i primi studi inerenti alle condizioni climatiche, al miglioramento delle condizioni,

all'attenzione dell'uso del verde ed altri aspetti concernenti l'area che nel corso degli anni è diventata la base di una progettazione sostenibile. [1]

Il progetto sovietico di tale arco di tempo è stato il primo riscontro ottenuto in termini di studio di un'utilità delle costruzioni, non basate sull'aspetto estetico come unico parametro di valutazione per la costruzione.
Questo primo passo verso l'ambito del risparmio energetico è poi decaduto a seguito di un ritorno delle forme architettoniche tipiche del mondo sovietico.
Il periodo appena successivo alla seconda guerra mondiale inoltre ha provocato la necessità di costruire diversi complessi basati su una edilizia a basso costo a causa delle continue migrazioni degli abitanti dei paesi rurali verso la città. Tale situazione critica non ha quindi potuto affermare uno sviluppo delle soluzioni a basso risparmio energetico.
Tuttavia, terminato il periodo di amministrazione sovietica a seguito della sua caduta, il paese ha subito un forte sviluppo di mercato tale da spingere il settore edilizio a voler emulare la situazione di crescente sviluppo di Dubai.
In particolare, la costruzione di nuovi distretti del business, centri direzionali, grattacieli ha caratterizzato questa fase di ascesa della città del Mar Caspio.
Le soluzioni adottate negli anni per il risparmio energetico non sono quindi mai state di tipo continuativo.
Ci sono tuttavia svariati casi esemplari che ne richiamano l'attenzione con grande imponenza diventando talvolta anche elementi caratterizzanti dello skyline di Baku.
La costruzione delle "Flame Towers" ne rappresenta un esempio di spicco, divenuto simbolo della città.
Le tre torri da cui è composto il progetto si dispongono a formare tra loro un triangolo; esse racchiudono ciascuna una funzionalità di utilizzo diversa: residenziale di lusso, torre ad uso hotel e torre ad uso uffici.

[1] Valiyev A. Baku. Cities 2013 4;31:625-640
[2] Shafaghat A, Keyvanfar A, Ferwati MS, Alizadeh T. Enhancing staff's satisfaction with comfort toward productivity by

Fig. 2.1 - "The Flame Towers" a Baku – Dia holding, http://www.diainsaat.com/ (ultimo accesso: Settembre 2016)

La configurazione non tradizionale delle tre torri spicca per la sua modernità; la morfologia atipica ha richiesto particolari attenzioni nella progettazione strutturale ed essendo completamente vetrato è stato effettuato un minuzioso studio in ambito del consumo energetico delle tre torri.

Lo sviluppo economico complessivo del paese inoltre ha fatto in modo che il mercato immobiliare diventasse nuovamente prospero. Forte è anche l'attività di diversi imprenditori edili locali e stranieri che investono in questo settore in nuovo sviluppo. Si è registrata infatti nel 2004 una crescita pari al 37% nel settore dell'edilizia dovuta alle sempre più numerose opportunità del mercato, e le opportunità per i nuovi soggetti nel settore che decidono di investire sul settore degli appartamenti di lusso, degli alberghi familiari e delle aree di vendita internazionale.

L'Azerbaigian è un mercato edilizio in forte espansione dovuto all'ingente investimento di capitali nelle infrastrutture locali, relativo a progetti del campo petrolifero e del gas.

Di conseguenza, questo settore economico è divenuto molto competitivo e si sono sviluppate diverse società in grado di sostenere i più elevati standard internazionali nell'edilizia.

Il settore è in progressiva crescita: dalla fine degli anni '90 si sono stati registrati sostanziali sviluppi dell'edilizia aziendale e residenziale, seguendo coerentemente l'aumento del potere d'acquisto sia delle imprese che dei nuclei familiari.

Non è tuttavia da sottovalutare lo sviluppo di numerose realizzazioni edili di carattere agricolo, industriale, infrastrutturale e terziario grazie a programmi mirati del governo dell'Azerbaigian per il miglioramento del proprio paese.
Una ricerca di mercato del settore dimostra quanto le possibilità del paese possano introdurre tecnologie di costruzione avanzata, a disposizione degli ambiti architettonici e ingegneristici.

La forte spinta verso un approccio mirato alle prestazioni degli edifici, ad un uno studio dell'impatto dell'edificio è partita dal 2006 con l'emanazione del decreto "Comprehensive action plan for improving the ecological conditions in the Azerbaijan Republic during 2006-2010" da parte del presidente dell'Azerbaigian Ilham Aliyev.
Sotto la sua amministrazione sono state realizzate diverse costruzioni e progetti per uno sviluppo di una consapevolezza maggiore degli aspetti energetici degli edifici.
Uno dei casi di più grande rilievo che si sta sviluppando a Baku è la riqualificazione di un intero quartiere da anni in disuso situato sul lato orientale del centro storico.
L'intervento si basa sulla rivitalizzazione dell'area attraverso una progettazione sostenibile, improntata sulla riduzione degli impatti sull'ambiente circostante, sulla progettazione a basso consumo energetico, sulle prestazioni di comfort dei futuri fruitori del quartiere.
L'esempio peculiare situato alle porte del quartiere è rappresentato dal Baku White City Office Building.

Fig. 2.2 - White City Office Building, http://en.president.az/ (ultimo accesso: settembre 2016)

Il complesso fornisce accesso a luce naturale da qualsiasi punto degli spazi interni adibiti ad ufficio, l'utilizzo di un sistema a ventilazione forzata e gli impianti di raffrescamento e riscaldamento ne garantiscono il livello di comfort percepito sempre elevato lungo tutto l'arco dell'anno.

Il sistema d'involucro è caratterizzato un sistema vetrato altamente performante per la riduzione dei disperdimenti termici, oltre ad avere ottime prestazioni acustiche.
È stato effettuato uno studio dettagliato basato anche su differenti strategie di efficientamento energetico basati sugli standard internazionali ASHRAE.

Il processo di ottimizzazione presentato nella presente tesi, nell'evenutalità di futuri risvolti progettuali e realizzativi, dovrà svilupparsi rispettando le normative nazionali attualmente in vigore in cui si innesta il caso di studio.

La tendenza nel metodo di costruire i nuovi edifici (in particolare quelli inerenti ad attività di ufficio) è quindi un utilizzo di ampie superfici vetrate che garantiscano maggiori utilizzi di illuminazione naturale degli ambienti con un controllo adeguato dei controlli in termini di fabbisogno complessivo.
La tesi di seguito esposta si muove in questo contesto e si prefigge di rimanere in linea con le metodologie di controllo adottate nella città di Baku.

3. IL RECUPERO DI UN EDIFICIO MULTIFUNZIONALE

3.1. DESCRIZIONE CONTESTO FISICO

L'edificio è situato nel centro storico di Baku, nell'area meridionale della città, nelle vicinanze della relativa area portuale.

Fig. 3.1 - Inquadramento

Esso è posto vicino a una strada carrabile di viabilità principale a Est e presenta di fronte alla facciata principale, posta a Sud, un ampio spazio adibito a parcheggio attorniato da muretti di contenimento che fungono anche da aiuole. Sono presenti inoltre arbusti di varie altezze nel circondario. E' presente di fronte all'ingresso principale una piccola costruzione monopiano con tettoia metallica.

Di rilevante importanza nei dintorni del lotto in analisi si trovano diverse costruzioni e infrastrutture moderne tra cui l'Heydar Aliyev Cultural Centre dell'architetto Zaha Hadid situato a Nord-Est della città vecchia; il parco zoologico di Baku situato nella parte Nord-occidentale; la Baku Slavic University e il New City Park che costeggia l'area portuale.

La città di Baku sta subendo una forte trasformazione nel campo dell'edilizia con grandi investimenti da parte di grandi imprenditori mondiali e richiama l'attenzione con i suoi nuovi grattacieli e la "Città Bianca" in fase di costruzione, consistente nella rigenerazione urbana su ampia scala di un grande distretto industriale dismesso per molti anni.

Fig. 3.1.2 - Vista Sud-Est e contesto circostante

3.2. CONTESTO CLIMATICO

Il clima dell'Azerbaigian si può distinguere in 4 aree specifiche:

1. la fascia costiera, depressa, dal confine russo alle foci del fiume Kura, caratterizzato dal clima temperato della steppa semidesertica e da inverni freddi, con scarsa quantità annuale di precipitazioni, che raggiungono valori al di sotto di 300 mm/anno;
2. il tratto costiero che si distende dalle foci del Kura al confine dell'Iran, è caratterizzato da un clima temperato caldo di tipo subtropicale umido con estate calda; questa area si presenta con precipitazioni crescenti da nord a sud (da 300 a 1200 mm/anno);
3. l'area entroterra, attraversata dal fiume Kura, si presenta caratterizzato da clima temperato e secco della steppa e inverni freddi con precipitazioni che si attestano su 250-500 mm/anno;
4. la zona del Caucaso e dei monti al confine con l'Armenia, con clima tipico di montagna, risulta fortemente condizionato da esposizione ed elevata altitudine. Le precipitazioni si aggirano sui 500-1000 mm/anno.

Baku, risulta compresa nella prima fascia, ed è caratterizzato quindi da un clima prevalentemente di tipo continentale, con inverni freddi ed estati calde.

Le temperature medie nella capitale sono le seguenti: gennaio 3,3 °C, aprile 11,0 °C, luglio 25,7 °C, ottobre 16,6 °C, con una media annuale pari a 14,2 °C. Considerata la posizione costiera, la forte escursione stagionale sembrerebbe anomala, tuttavia essendo il Mar Caspio un mare chiuso, si scalda molto in estate e al contrario raggiunge basse temperature in inverno, fenomeno ampliato perché aperto verso le steppe russe e kazake le quali in inverno sono attraverate dai venti freddi provenienti dai territori siberiani raggiungendo perfino Baku.

Gli inverni sono freddi ma sono mitigati parzialmente dalla presenza della catena del Caucaso nella parte settentrionale che protegge dalla discesa dei venti freddi provenienti dal continente, mentre la fascia costiera è soggetta a venti attenuati dalla presenza del Mar Caspio.

Le estati sono molto aride, e la quantità di precipitazioni, al di sotto dei 300 mm/anno, rendono la stagione estiva paragonabile ai climi semidesertici.

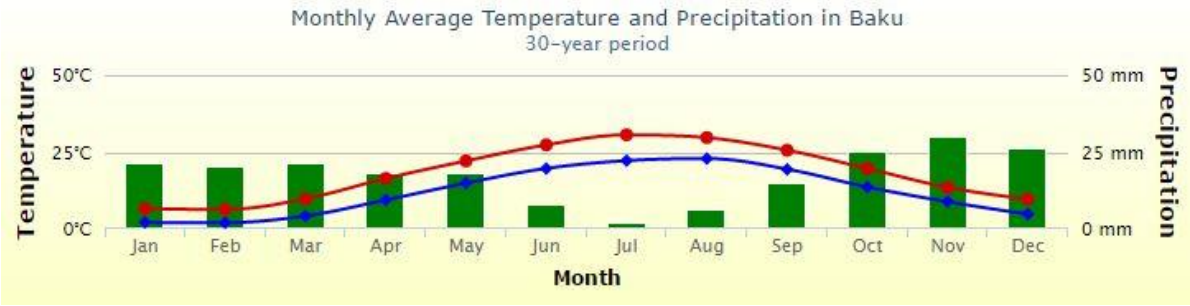


Fig. 3.2 - Andamento delle temperature e delle precipitazioni a Baku

Baku è quindi una zona particolarmente ventosa con bore invernali nordiche e venti caldi estivi provenienti da Sud che determinano la presenza di vento durante tutto il periodo dell'anno, rimanendo costante e aggirandosi su un valore medio di circa 18 km/h.

La presenza di forti venti sarà un aspetto che contribuirà alle future scelte di progettazione della riqualificazione dell'edificio.

3.3. LE CONDIZIONI E LO STATO DI DEGRADO

Il complesso edilizio si compone di due volumi ben distinti.

Il primo, più basso rispetto all'altro volume, è composto da due piani fuori terra:

- Il piano terra presenta un'ampia vetrata composta da 19 pannelli (8 su entrambi i lati dell'ingresso + 3 pannelli posti superiormente all'ingresso)che funge da accesso primario rivolto verso Sud.

  E' presente inoltre una tettoia in corrispondenza delle porte vetrate d'ingresso e due piccole aiuole ai lati della tettoia con due arbusti di medie dimensioni ciascuna.

  Sul lato più a Ovest il piano terra è caratterizzato da un ingresso secondario e finestre di piccola dimensione;
- Il piano primo presenta sopra all'ingresso tre grandi aperture vetrate, mentre verso Ovest vengono all'incirca riproposte le stesse aperture del piano terra.

Fig. 3.3 - Facciata Sud, ingresso principale

Sulla facciata Est che dà sulla strada, le finestre del corpo basso sono disposte in modo regolare, tutte allineate sui due piani e sono contornate da una cornice decorativa.

Fig. 3.4 - Vista Umana facciata Sud-Est

Il secondo corpo si sviluppa su quattro piani fuori terra e risulta più arretrato rispetto al corpo più basso.

Ci sono alcuni elementi peculiari che caratterizzano la facciata:

Agli estremi sono disposti degli elementi di cornice rettangolari attorno alle parti vetrate dei corpi scala dell'edificio.

Sono inoltre presenti delle lunghe e strette fasce vetrate sviluppate in altezza e interrotte tramite pannelli opachi in corrispondenza dei solai interpiano.

Tali fasce, a Sud, sono sormontate da degli elementi architettonici posizionati in copertura.

L'edificio è completamente rivestito in piastrelle di materiale lapideo di dimensioni quadrate per quanto riguarda il corpo basso e rettangolari per il corpo più alto. I serramenti presenti sono invece caratterizzati da un telaio di colore bianco (vedi Fig. 3.3 e Fig. 3.4).

Le condizioni di degrado presentate dall'edificio non sono uniformi ma individuate puntualmente in punti differenti del rivestimento:

la condizione di degrado più evidente ad un preliminare controllo visivo è la presenza di distacchi del rivestimento lapideo in facciata, concentrati prevalentemente in corrispondenza dello spigolo Sud del corpo edilizio più alto. Si riesce infatti ad intravedere il supporto murario retrostante, dato importante che ha permesso di stabilire un'ipotesi costruttiva coerente e la più vicina possibile alla stratigrafia reale.
L'assenza di dati relativa al metodo costruttivo del progetto iniziale ha portato ad assumere un pacchetto stratigrafico utilizzando un'analisi combinata di condizioni di degrado, piante architettoniche e cultura costruttiva del paese.

Il rivestimento si presenta ingiallito (alterazione cromatica) da depositi di polveri e sporcizia da inquinamento atmosferico, tipici dell'invecchiamento nel tempo dei materiali lapidei.

Depositi più marcati si evidenziano alla base dell'edificio dove con molta probabilità, durante i rari periodi di precipitazione, la sporcizia proveniente dalla pavimentazione perimetrale è rimbalzata sui primi centimetri del rivestimento dell'edificio in concomitanza di risalita capillare di acqua che ne facilita la diffusione.

Non si rilevano fenomeni di efflorescenza in facciata.

Di seguito vengono riportati gli elaborati grafici inerenti all'inserimento della planimetria nel contesto e le piante indicative dei vari piani.

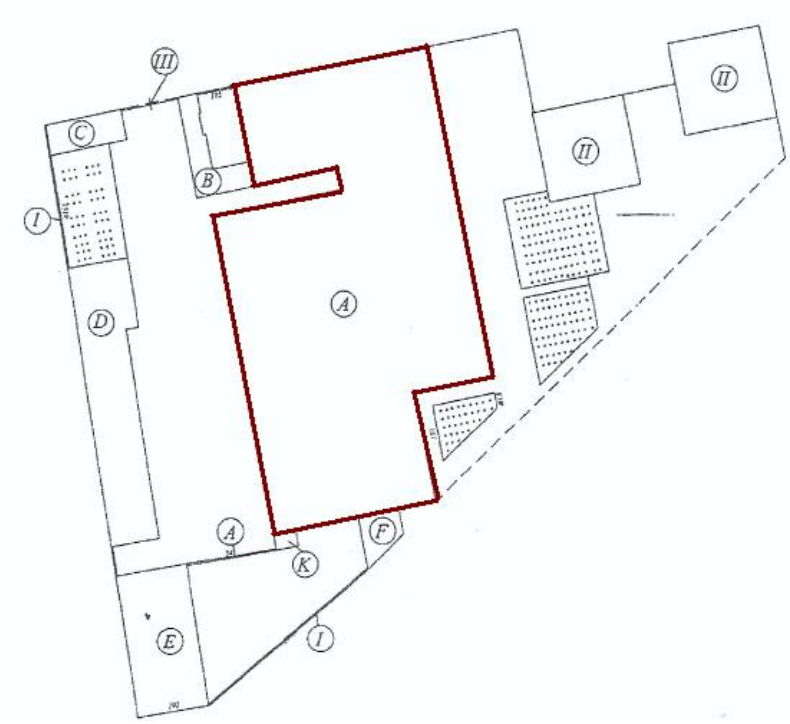


Fig. 3.5 - Planimetria generale

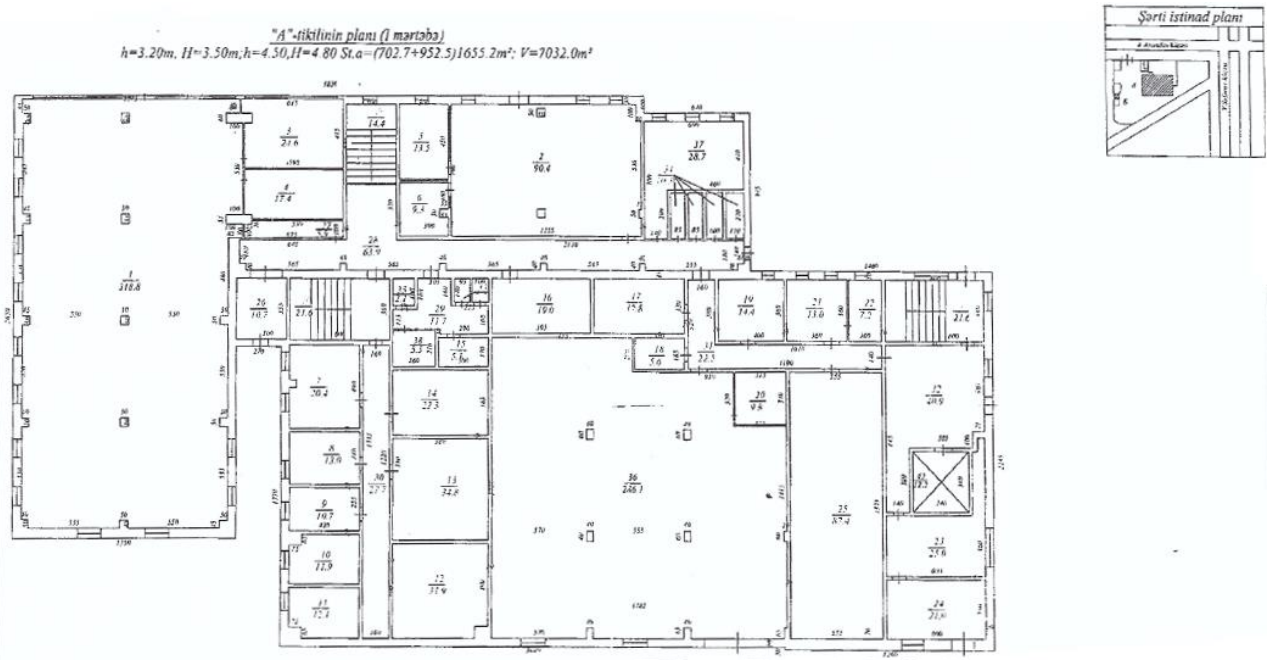


Fig. 3.6 - Pianta piano terra

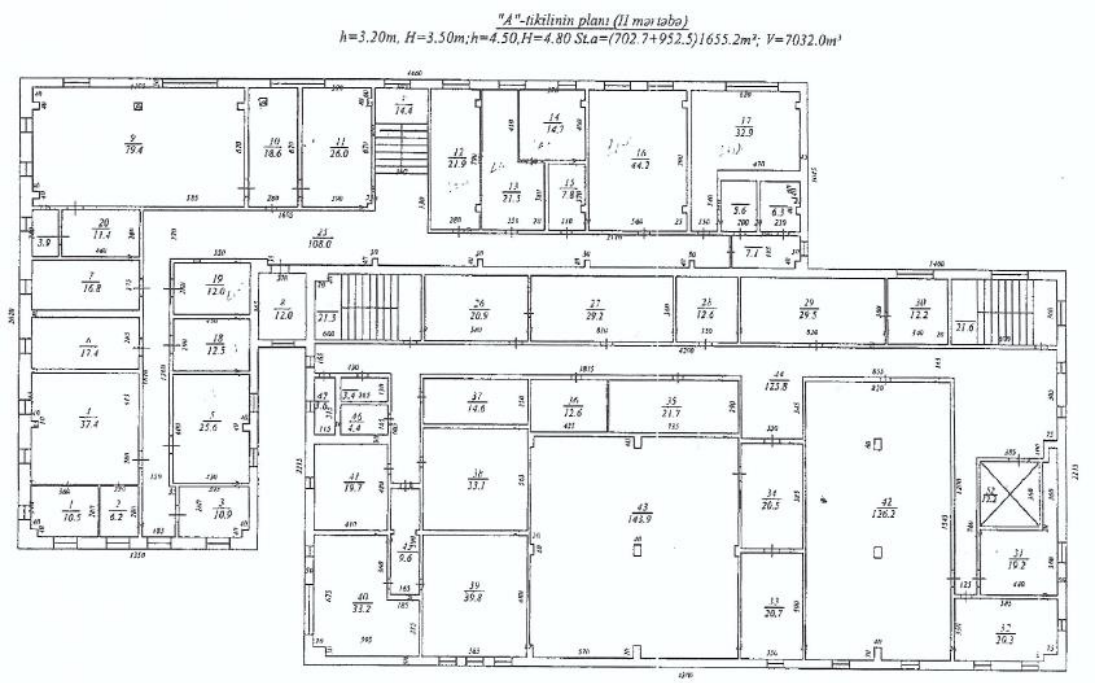


Fig. 3.7 - Pianta piano primo

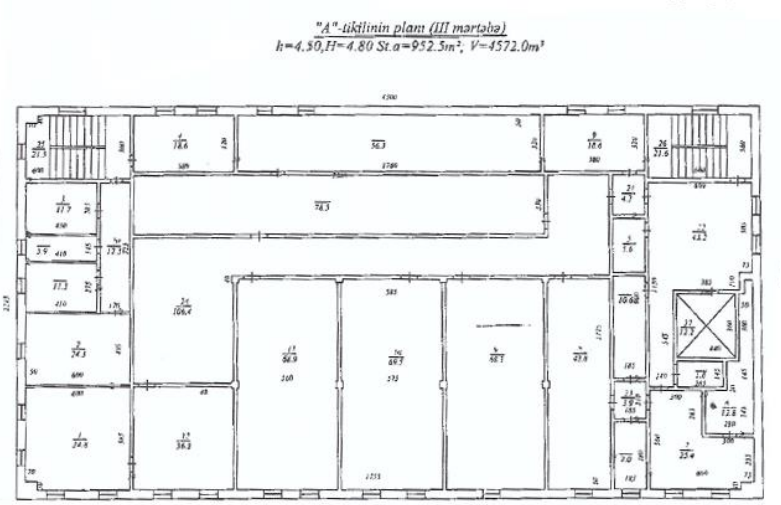


Fig. 3.8 - Pianta piano secondo

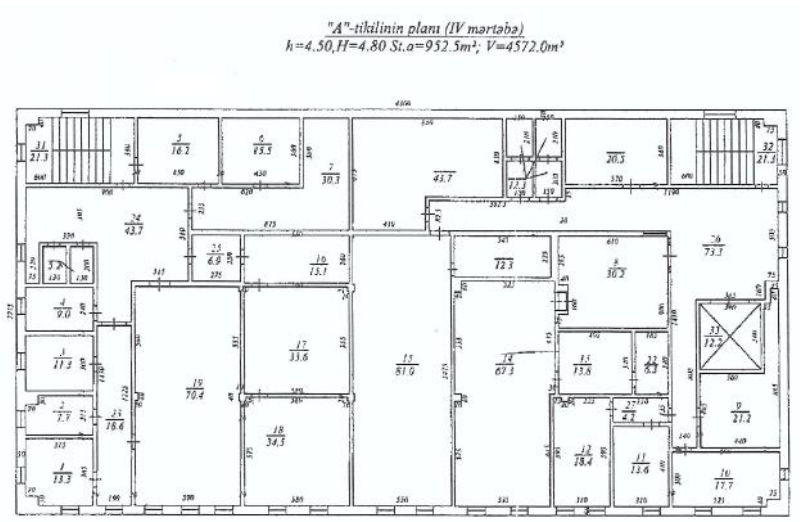


Fig. 3.9 - Pianta piano terzo

L'edificio in esame presenta inoltre un corpo scala situato a Sud in posizione centrale per quanto riguarda il corpo basso B e due corpi scala con doppia rampa posti diametralmente opposti sugli angoli Sud-Est e Sud ovest del corpo alto A.

Di seguito sono riportati in modo tabellare e sintetico i dati relativi alle quantità di superficie di muri perimetrali e serramenti:

-Percentuale superficie vetrata/superficie opaca: 10,13%

-Superficie pavimentata: 4094,97 m^2

CORPO BASSO (B)

Serramenti	Base [m]	altezza [m]	Area [m^2]	NORD	SUD	EST	OVEST	TOT
90x190 cm	0.9	1.9	1.71	0	0	8	0	8
60x240 cm	0.6	2.4	1.44	0	0	8	0	8
290x210 cm	2.9	2.1	6.09	0	4	0	0	4
90x210 cm	0.9	2.1	1.89	7	14	0	6	27
Vetrata ingresso	16.2	3.05	49.41	0	1	0	0	1

Tabella 3.3.1 - Elenco serramenti stato di fatto corpo basso (B)

	NORD	SUD	EST	OVEST	Tot vert.	Copertura	terra
Superficie opaca [m^2]	142.51	385.671	207.18	191.922	927.28	689.82	689.82
Superficie vetrata [m^2]	13.23	100.23	25.2	11.34	150	0	0

Tabella 3.3.2 - Quantità superfici corpo basso (B)

Piani fuori terra: 2

Altezza: 8.70 m

CORPO ALTO (A)

Serramenti	Base [m]	altezza [m]	Area [m^2]	NORD	SUD	EST	OVEST	TOT
150x50 cm	1.5	0.5	0.75	0	12	12	16	40
80x200 cm	0.8	2	1.6	0	12	16	7	35
90x210 cm	0.9	2.1	1.89	43	4	0	1	48
400x300 cm	4	3	12	1	0	0	0	1
305x200	3.05	2	6.1	0	1	0	0	1

Tabella 3.3.3 – Elenco serramenti stato di fatto corpo alto (A)

	NORD	SUD	EST	OVEST	Tot vert	Copertura	terra
Superficie opaca [m^2]	742.035	569.845	350.6	469.91	2132.39	676.33	676.33
Superficie vetrata [m^2]	93.27	41.86	34.6	25.09	194.82	0	0

Tabella 3.3.4 – Quantità superfici corpo alto (A)

Piani fuori terra: 4

Altezza: 22.5 m (compreso elemento non riscaldato in copertura)

3.4. GLI OBIETTIVI DI PROGETTO

3.4.1 GLI OBIETTIVI FUNZIONALI/SPAZIALI

L'edificio preso in considerazione è attualmente un centro direzionale telefonico.

Al fine di perseguire un corretto intervento di riqualificazione è stato necessario stabilire degli obiettivi funzionali per la futura gestione dell'edificio.

L'obiettivo che si desidera ottenere dal punto di vista funzionale è una trasformazione in chiave moderna di questo complesso in una sede centrale di un parco tecnologico con attività ad uso uffici.

La volontà di ottenere una configurazione più dinamica e fluida dell'utilizzo dei vari piani ha condotto ad una scelta caratterizzata da ampi spazi open space all'interno delle quali si possano gestire e variare nel modo più flessibile le postazioni di lavoro degli utenti.[2]

[2] Shafaghat A, Keyvanfar A, Ferwati MS, Alizadeh T. Enhancing staff's satisfaction with comfort toward productivity by sustainable Open Plan Office Design. Sustainable Cities and Society 2015 12;19:151-164.

Gli uffici open space garantiscono inoltre migliore accesso all'illuminamento naturale permettendo quindi un riscontro positivo anche in termini di consumi elettrici dovuti all'illuminamento dei locali interni.

Un maggiore percezione di spazio permette un'interazione più agevole dei lavoratori influenzando la sensazione di benessere e produttività all'interno dell'ambiente lavorativo.

La fig. 3.10 mostra i benefici di una corretta progettazione degli uffici e le interazioni che intercorrono tra le diverse aree della sostenibilità.

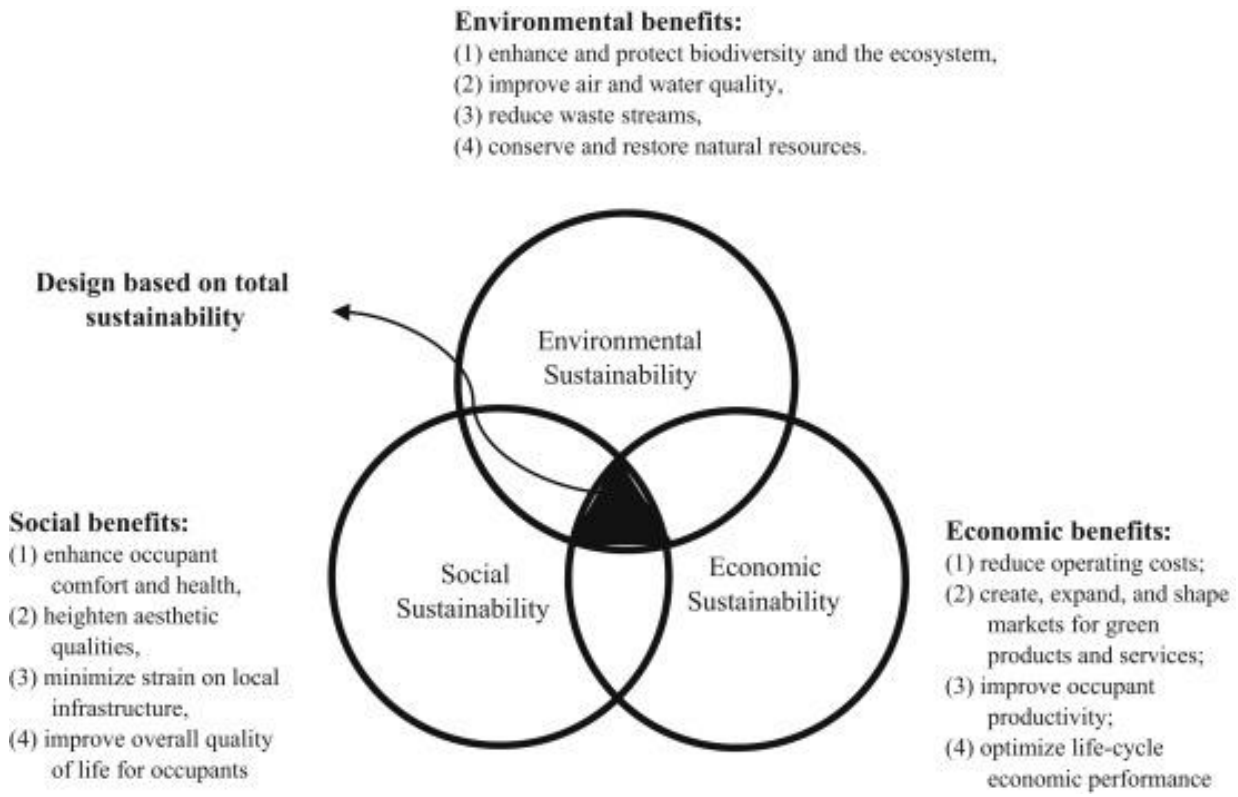


Fig. 3.10 - Relazioni tra principi ambientali , economici e sociali nella progettazione di un edificio per uffici sostenibile (US EPA 2010)

La presenza di numerosi superfici murarie all'interno dell'attuale edificio non rispecchiano quindi le condizioni che si vogliono ottenere a seguito della riqualificazione.

L'ambiente interno è infatti costituito da numerosi locali singoli e doppi che si sviluppano attorno al perimetro dell'edificio per sfruttare l'illuminazione naturale dei serramenti presenti.

I connettivi di distribuzione orizzontale sono disposti centralmente come lunghi illuminati nella maggior parte da piccole aperture verso l'esterno. L'utilizzo di luci all'interno dei connettivi diventa una soluzione obbligata per sopperire alla mancanza di adeguata luce naturale.
L'idea che si è delineata necessita quindi di una demolizione di gran parte delle partizioni interne a favore di più ampi spazi di lavoro.
Tale cambiamento di conformazione interna comporta delle variazioni specifiche in termini di superfici vetrate per garantire illuminamenti di progetto provenienti da fonti naturali anche negli ambienti più lontani dalle componenti trasparenti dell'edificio.

3.4.2 GLI OBIETTIVI PRESTAZIONALI

Oltre a fornire soluzioni distributive funzionali, non si può prescindere dalla corretta riqualificazione in nei confronti delle prestazioni che si vogliono ottenere.

L'approccio prestazionale di una buona progettazione dovrebbe fornire adeguate soluzioni in termini di:

- comfort acustico

- comfort visivo

- comfort termico

- comfort fisico/fisiologico (qualità dell'aria).

Gli aspetti che verranno trattati maggiormente in questa tesi sono basati principalmente sull'efficientamento energetico dal punto di vista del raffrescamento e del riscaldamento del complesso, adottando particolari accorgimenti in ambito del comfort visivo per quanto riguarda la possibilità di avere una migliore condizione visiva da illuminamento naturale.

Considerazioni sulle sensazioni visive degli utenti sono state analizzate per avere una concezione più ampia del progetto.

L'obiettivo principale è rappresentato dalla valutazione dei fabbisogni termici estivi ed invernali con lo scopo di intervenire direttamente sulle proprietà di involucro per ridurre i consumi energetici dell'edificio.

Le ulteriori condizioni di comfort non sono state analizzate ma si ipotizza ai fini analitici che le altre tipologie di prestazioni siano rispettate.

4. GLI STRUMENTI DI ANALISI

Di seguito verranno elencati i software utilizzati per svolgere le analisi e le elaborazioni grafiche:

OpenStudio: questo software è un plugin del programma Sketchup che permette la rappresentazione grafica e garantisce la restituzione delle caratteristiche assegnate ai vari elementi creati nel modello all'interno del software di simulazione energetica tramite file IDF (Input Data File). Nel caso in analisi, tuttavia, il programma è stato unicamente utilizzato per la rappresentazione grafica del modello; tale scelta è stata considerata poiché il programma di simulazione non possiede un'interfaccia grafica, bensì si basa sull'inserimento delle coordinate dei vertici dei vari elementi costituenti.
Per quanto riguarda il controllo dei parametri si è preferito lavorare direttamente all'interno del programma di simulazione.

Energyplus: Software di simulazione dinamica che fornisce come informazioni di output diverse informazioni inerenti a questioni energetiche e termiche del modello inserito al suo interno.
È un programma di simulazione energetic ache ignegneri, architetti e ricercatori utilizzano per modellare oltre al cunsumo energetico, adibito al riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminamento e apporti interni, anche il consumo di acqua dell'edificio. Questo permette di garantire una vision globale dell'energia primaria dell'edificio preso in considerazione.
Il suo sviluppo è stato portato avanti dal U.S. Department of Energy Building Technologies Office.
Alcune principali caratteristiche di cui il sistema EnergyPlus è composto sono le seguenti:

- Soluzioni simulltanee e integrate delle condizioni delle diverse zone termiche (comprendendo le condizioni dell'edificio, del sistema e degli impianti);
- Soluzioni in risposta a processi di riscaldamento, raffrescamento, flussi d'aria ma anche controlli sull'umidità e temperature superficiali;
- Fornisce soluzioni basate su calcoli suborari, con step di tempo assegnabili manualmente dall'utente (il time step assegnato di default è di 15 min) a seconda delle interazioni tra zone termiche, ambiente e sistema HVAC tali da garantire risultati dinamici in grande velocità e precisione;
- Possibilità di effettuare scelte avanzate per quanto riguarda le parti vetrate assegnando direttamente i sistemi di oscuramento desiderati (modificabili dall'utente a seconda delle esigenze di progetto), sistemi vetrati elettrocromici ed eventuale stratigrafia per una maggiore accuratezza di calcolo;

- Possibilità di interfacciarsi con differenti programmi esterni (OpenStudio, Green building studio, ecc);
- Calcoli di illuminamento con eventuale controllo dell'abbagliamento;
- Sommari standard e report dettagliati in output a seconda delle informazioni desiderate dall'utente;
- Vasta quantità di dati climatici presenti nel database del software, con aggiunte integrabili dal sito stesso.

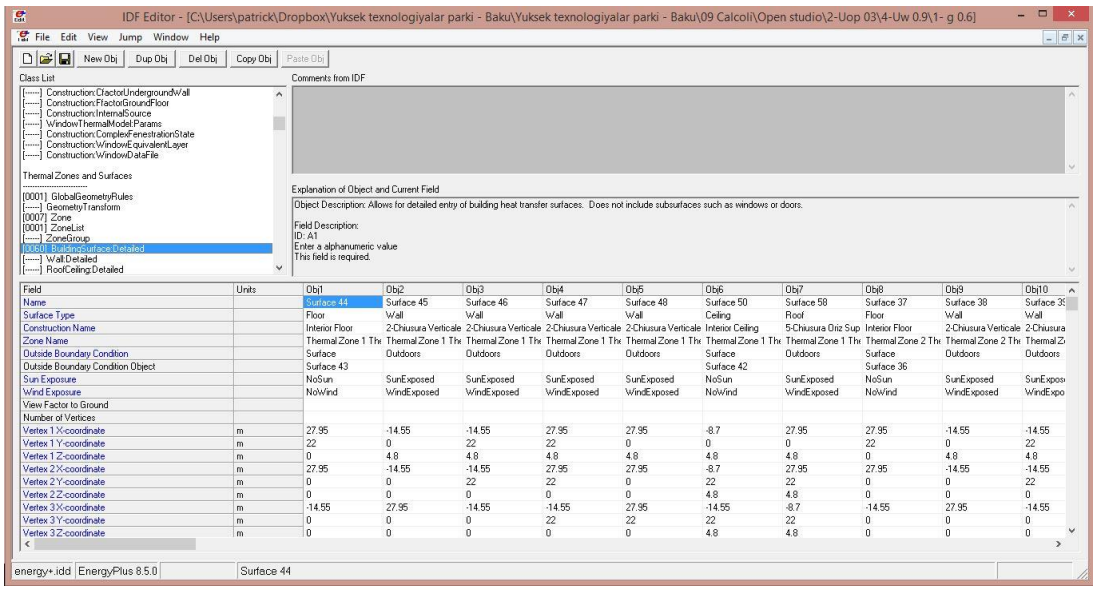


Fig. 4.1 - Interfaccia software EnergyPlus

EnergyPlus è gratuito ed open-source; funziona su tutte le piattaforme informatiche.
Il software è creato da U.S. Department of Energy (DOE), Building Technologies Office (BTO) e gestito da National Renewable Energy Laboratory (NREL); il suo sviluppo continua a progredire in collaborazione con NREL, diversi laboratori nazionli DOE, istituzioni accademiche e fondi privati.

Kerkythea: software di renderizzazione del modello rappresentato in Sketchup. Lo sviluppo di un render delle soluzioni che si otterrano nel processo di ottimizzazione sono state realizzate per valutare la convenienza di una scelta rispetto ad un'altra anche dal punto di vista della percezione visiva degli utenti all'interno del complesso edilizio.
Il concetto di base che sta dietro al processo di renderizzazione consiste nell'assegnare a ciascun elemento un materiale preciso in modo tale da rendere realistica la rappresentazione finale.

5. IPOTESI E DATI D'INGRESSO

Prima di analizzare l'edificio oggetto di analisi è stato necessario sviluppare preventivamente delle ipotesi costruttive, di utilizzo funzionale degli spazi interni e definire la temperatura interna di comfort desiderato.

Per fare scelte plausibili in termini costruttivi è stata condotta una breve ricerca sulle metodologie costruttive del luogo dello scorso secolo ipotizzando la realizzazione del manufatto in quel periodo.

Da tale ricerca si è evinto che il "modus costruendi" del periodo successivo alla caduta dell'Impero sovietico, è stato per molto tempo influenzato dal metodo costruttivo europeo e dal mondo occidentale in generale (Passarelli, Exportiamo, 2014).[3]

Tale informazione, combinata con l'analisi di degrado dell'edificio tramite documentazione fotografica e l'analisi delle piante architettoniche, ha portato ad una ipotesi di costruzione tradizionale europea "a cassetta".

Dalle piante architettoniche si può anche ben notare come l'involucro presenti talvolta delle porzioni a muratura portante e in altre porzioni, dove necessarie luci maggiori per gli spazi interni, si è adottata una struttura a telaio (pilastri e travi).

Di seguito verranno esposte le soluzioni tecnologiche di involucro, di copertura, di solaio controterra e dei serramenti adottati per la successiva analisi energetica.

CHIUSURA ORIZZONTALE SUPERIORE

Strato	spessore [m]	conduttività [W/(m*K)]	resistenza [s/λ]	Trasmittanza [W/(m^{2}K)]
Resistenza termica sup. int			0.1	1.211
Pavimentazione interna in gres	0.15	1.47	0.102	
Malta di cemento	0.01	1.4	0.007	
Guaina bituminosa impermeabilizzante	0.008	0.2	0.040	
Massetto di pendenza in cls ordinario	0.06	0.3	0.180	
Malta di cemento	0.01	0.3	0.033	
Soletta (blocchi in laterizio + travetti in cls)	0.24	-	0.300	
Intonaco esterno	0.01	0.43	0.023	
Resistenza termica sup. est			0.040	
		Rtot=	0.826	

Tabella 3.4.1- Stratigrafia e trasmittanza chiusura orizzontale superiore

[3] Passarelli, Focus Azerbaijan: Uno sguardo da Baku. Intervista al direttore dell'Ufficio ICE di Baku, Dott. Luigi D'Aprea. http://www.exportiamo.it/aree-tematiche/9588/focus-azerbaijan-uno-sguardo-da-baku-intervista-al-direttore-dell-ufficio-ice-di-baku-dott-luigi-d-aprea/ (ultimo accesso: settembre 2016)

CHIUSURA ORIZZONTALE INFERIORE

Strato	spessore [m]	conduttività [W/(m*K)]	resistenza [s/λ]	Trasmittanza [W/(m^{2}K)]
Resistenza termica sup. int			0.17	1.092
Pavimentazione interna in gres	0.01	2.5	0.004	
Massetto di integrazione impiantistica	0.1	0.9	0.111	
Massetto di livellamento	0.1	1.1	0.091	
Vespaio ghiaia	0.25	0.5	0.500	
Resistenza termica sup. est			0.040	
		Rtot=	0.916	

Tabella 3.4.2 - Stratigrafia e trasmittanza chiusura orizzontale inferiore

CHIUSURA VERTICALE PORTANTE

Strato	spessore [m]	conduttività [W/(m*K)]	resistenza [s/λ]	Trasmittanza [W/(m^{2}K)]
Resistenza termica sup. int			0.13	1.330
Intonaco interno	0.01	0.43	0.023	
Muratura portante in mattoni pieni	0.25	0.7	0.357	
Intercapedine d'aria	0.06	-	-	
Muratura di tamponamento esterno	0.12	0.7	0.171	
Lastre di rivestimento in pietra	0.03	1	0.030	
Resistenza termica sup. est			0.040	
		Rtot=	0.752	

Tabella 3.4.3 - Stratigrafia e trasmittanza chiusura verticale portante

CHIUSURA VERTICALE DI TAMPONAMENTO

Strato	spessore [m]	conduttività [W/(m*K)]	resistenza [s/λ]	Trasmittanza [W/(m^{2}K)]
Resistenza termica sup. int			0.13	1.766
Intonaco interno	0.01	0.43	0.023	
Muratura di tamponamento interno	0.12	0.7	0.171	
Intercapedine d'aria	0.06	-	-	
Muratura di tamponamento esterno	0.12	0.7	0.171	
Lastre di rivestimento in pietra	0.03	1	0.030	
Resistenza termica sup. est			0.040	
		Rtot=	0.566	

Tabella 3.4.4 - Stratigrafia e trasmittanza chiusura verticale di tamponamento

SERRAMENTI

Anche per quanto riguarda i serramenti sono state fatte delle ipotesi costruttive, considerando tutti i telai realizzati in alluminio non isolato e la parte vetrata costituita da un vetro singolo.

Utilizzando i dati e le tabelle della norma UNI 11300 si è potuto estrapolare una trasmittanza del serramento tabellata.

Tipo di vetrata	*Ug*	***Uw* con area del telaio pari al 20%** rispetto all'area dell'intera finestra in rapporto ai differenti valori *Uf* del telaio								***Uw* con area del telaio pari al 30%** rispetto all'area dell'intera finestra in rapporto ai differenti valori *Uf* del telaio							
		1,8	2,0	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	7,0	1,8	2,0	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	7,0
Singola	5,7	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3	6,0	4,5	4,6	4,6	4,8	4,9	5,0	5,1	6,1
4-6-4	3,3	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	4,1	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	4,5
4-9-4	3,1	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,9	2,9	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	4,3
4-12-4	2,9	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,8	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	4,2

Fig. 5.1 - Valori tabellati di trasmittanza dei serramenti (UNI 11300-1)

Ipotizzando quindi una percentuale del telaio pari al 20% della finestra è stato ottenuto un valore U_w=6,0 W/m^{2}K.

Per quanto riguarda il valore della trasmittanza solare (g) si è fatto affidamento alle indicazioni tabellate della normativa.

Trasmittanza di energia solare totale $g_{gl,n}$ di alcuni tipi di vetro

Tipo di vetro	$g_{gl,n}$
Vetro singolo	0,85
Doppio vetro normale	0,75
Doppio vetro con rivestimento basso-emissivo	0,67
Triplo vetro normale	0,70
Triplo vetro con doppio rivestimento basso-emissivo	0,50
Doppia finestra	0,75

Fig. 5.2 - Valori di $g_{gl,n}$ (UNI 11300-1)

Avendo ipotizzato dei vetri singoli, il valore di $g_{gl,n}$ di riferimento è pari a 0,85. Questo dato moltiplicato per il fattore riduttivo Fw=0,9 fornisce il valore di g=0,765 assimilato per arrotondamento a g=0,75.

5.1. MODELLAZIONE

Aiutandosi con gli elaborati grafici a disposizione, si è potuto ricostruire il modello su Openstudio, assegnando ai vari elementi le caratteristiche di chiusure esterne , coperture, serramenti. Grazie al software è stato possibile definire delle zone termiche, assimilabili ai diversi piani dell'edificio, per trarne successivamente diverse informazioni utili (termiche ed energetiche) ai fini delle analisi di seguito presentate.

Una volta esportato il modello grafico sotto forma di informazione all'interno di Energyplus è stato possibile approfondire maggiormente le condizioni degli elementi costituenti il complesso.

Si è quindi associato ai muri perimetrali la relativa stratigrafia associando a ciascuno strato i valori di spessore e conducibilità termica in modo da ottenere il valore di trasmittanza U calcolata preventivamente in fase di ipotesi stratigrafica.
Il procedimento è stato simile nel caso dei serramenti ai quali sono stati assegnati all'interno del software di calcolo i valori di trasmittanza U e di trasmittanza solare g.

Le informazioni ottenute in risposta dal software sono state tabellate in Excel per poter sempre avere a disposizione e in modo immediato i dettagli sintetici delle simulazioni effettuate.
Questa raccolta di dati è risultata molto pratica per estrapolare grafici di vario genere e fare delle analisi a riguardo.

Il calcolo che Energyplus è in grado di fornire dati basati su elementi dinamici, variabili quindi nel tempo. Tale approccio è stato possibile grazie all'inserimento all'interno del software di file climatici (weather data) che specificano le temperature e la quantità di radiazione solare lungo tutto l'arco dell'anno.
Il file climatico inserito è stato quello della limitrofa località Tabriz, presente all'interno del database di Energyplus.

I risultati estrapolati riguardano i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento che successivamente, associati ai valori di illuminamento, porteranno a scegliere determinati range di soluzione rispetto ad altri meno favorevoli. Tale aspetto è stato valutato nella scelta delle diverse soluzioni in quanto il comfort interno degli utenti è un parametro importante nella progettazione edilizia.

Per garantire tale benessere interno è necessario garantire determinate temperature estive ed invernali oltre ad una corretta percentuale di umidità negli ambienti. Lo standard di illuminamento interno è stato inoltre garantito per poter utilizzare al meglio la luce naturale.

Le analisi effettuate si sono basate principalmente su aspetti termici, considerando che l'edificio venga attrezzato con adeguate unità di trattamento aria (UTA) in grado di controllare l'umidità degli ambienti lavorativi e di smaltire eventuale umidità in eccesso.
Le temperature operative interne assegnate sono pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per il periodo estivo. Il contributo dei ricambi d'aria garantiti è stato considerato pari a 0.0056 m^3/s.

Ai fini delle analisi, è stato imposta una programmazione oraria delle attività d'ufficio, comprendente l'attività degli occupanti, l'utilizzo di apparecchi elettrici e le luci, pari ad un lasso di tempo che va dalle 9:00 alle 20:00 per tutto il corso dell'anno.

Per quanto riguarda l'abbigliamento degli utenti interni non si sono applicati accorgimenti di differenziazione estivo/invernale.

Di seguito vengono esposti i dati di ingresso utilizzati per la simulazione, in accordo con la UNI EN 15251 e i dati ottenuti da esso:

Latitudine: 40.32 °

Longitudine: 49.82°

	Inverno	Estate
Programma attività d'ufficio (utenti, luci, apparecchi)	9.00-20.00	9.00-20.00
Temperatura operativa interna (°C)	20	26
Ricambi d'aria (m^3/h)/s persona)	0.0056	0.0056
Umidità relativa (%)	50	50
N° occupanti al m^2	0.05	0.05
Carichi illuminazione (W/m^2)	12	12
Carichi interni apparecchi (W/m^2)	8	8

Tabella 5.1.1 - Condizioni di progetto ipotizzate

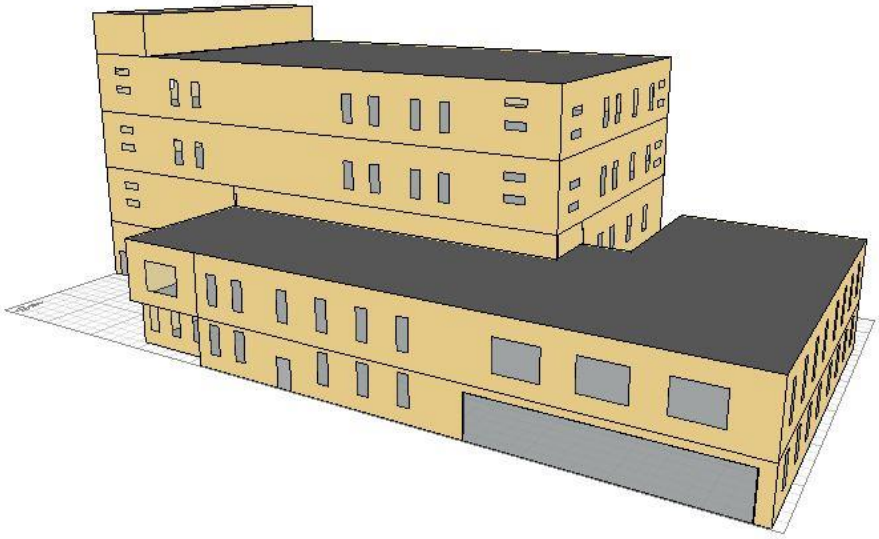


Fig. 5.3 - Modello geometrico

Stato di fatto	kWh	kWh/m^2
Fabbisogno Invernale	332353	63.27
Fabbisogno Estivo	187331	35.66

Tabella 5.1.2- Fabbisogno stato di fatto

Dai risultati ottenuti per quanto riguarda i fabbisogni si può notare come il fabbisogno invernale richieda degli accorgimenti maggiori in termini di consumi, quasi il doppio della richiesta estiva.

Il modello è stato quindi il punto di partenza per le successive ipotesi migliorative del complesso, in funzione anche della sua ridestinazione funzionale.

OpenStudio è risultato fondamentale per la trasposizione del modello geometrico in un modello energetico esportabile in modo diretto in EnergyPlus nel quale sono state inserite le dovute implementazione di dati precedentemente indicati nelle tabelle.

Le tabelle presentate di seguito manterranno lo stesso stile proposto sullo stato di fatto: i valori indicati nelle celle azzurre rappresenteranno la situazione di fabbisogno invernale, i valori in rosa salmone rappresenteranno i risultati inerenti al fabbisogno estivo.

6. ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE

6.1. INTRODUZIONE

L'edificio preso in considerazione per l'ottimizzazione che ci si presta ad effettuare è attualmente un centro direzionale telefonico.

L'obiettivo posto alla base delle analisi è una trasformazione in chiave moderna di questo complesso in una sede centrale di un parco tecnologico con attività ad uso uffici, con ampi spazi open space e buon illuminamento naturale; l'idea che si è delineata necessita quindi di una demolizione di gran parte delle partizioni interne a favore di un più ampio spazio di lavoro.

Tale cambiamento di conformazione interna comporta delle variazioni specifiche in termini di superfici vetrate per garantire illuminamenti interni di progetto anche negli ambienti più lontani dalle componenti trasparenti dell'edificio.

Tuttavia si evidenzieranno diverse casistiche attraverso un'analisi parametrica.

6.2. PROGRESSIONE A CASCATA DEL PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE

L'ottimizzazione che si è cercato di ottenere si basa su variazioni graduate di un parametro alla volta, coprendo progressivamente tutte le casistiche tra parametri possibile in un procedimento a cascata. I risultati ottenuti a ciascuna variazione sono stati esportati sotto forma di grafico in modo da rendere più immediata la registrazione delle variazioni analizzandone il comportamento.

L'obiettivo posto in partenza è stato la riduzione del valore di fabbisogno termico estivo/invernale; si è pertanto intervenuto sui parametri che maggiormente influiscono sull'involucro e le relative prestazioni

energetiche, ovvero la trasmittanza U valutata in W/m^2K sia della componente opaca che di quella vetrata d'involucro, la trasmittanza solare g delle superfici trasparenti.
Infine si è valutata anche la variazione di percentuale di superficie vetrata per tenere in conto anche di successive valutazioni in termini di comfort di illuminamento.
Nella seconda fase dell'ottimizzazione sono state eseguite simulazioni parametriche per quanto riguarda le tipologie di sistemi di oscuramento.
Sono state infatti indagate diverse soluzioni di oscuramento esterno, variando per ciascuna più parametri, di seguito meglio specificati, seguendo lo stesso procedimento a cascata effettuato precedentemente.
I valori di trasmittanza degli elementi opachi inseriti all'interno del programma di simulazione non erano inseribili in modo diretto; per poter ottenere la variazione di trasmittanza desiderata si è dovuto agire sulla stratigrafia dei pacchetti di chiusura verticali e orizzontali. Sono stati associati tre diversi spessori di isolamento termico posto esternamente ottenendo quindi tre nuovi valori di trasmittanza U.

Spessore isolante (cm)	6	8	10
Trasmittanza U_{op} (W/m2K)	0.4	0.3	0.2

Tabella 6.2.1 - Trasmittanze termiche considerate per l'ottimizzazione degli elementi opachi

La variazione di trasmittanza dei serramenti è stata svolta seguendo la medesima procedura: i valori in questo caso sono stati inseriti manualmente considerando inizialmente il valore di g fisso a 0.75.
I valori assunti in questo caso sono stati scelti in funzione delle prestazioni attualmente raggiungibili e ampiamente diffuse nel mercato dell'edilizia.

Trasmittanza Uw (W/m2K)	1.5	1.3	1.1	0.9

Tabella 6.2.2 - Trasmittanze termiche considerate per l'ottimizzazione dei serramenti

Analogamente, è stato fatto variare un altro parametro influente sulle prestazioni del serramento: il valore di trasmittanza solare g.
Spesso in funzione delle condizioni al contorno tale valore deve assumere un range di valori ben definito in quanto è in grado di controllare l'ingresso di apporto solare all'interno dell'edificio. Una

buona regola di base sarebbe poter sfruttare gran parte degli apporti solari invernali ma contemporaneamente cercare di minimizzarli nel periodo estivo.
Tendenzialmente c'è uno stretto legame tra valore della trasmittanza solare e la trasmittanza luminosa; a valori di g sempre più piccoli si riduce in modo proporzionale anche la quantità di luce che il vetro è in grado di fare entrare negli ambienti interni. A tal proposito tuttavia esistono delle tipologie di vetro, come ad esempio i vetri basso-emisssivi o selettivi che, grazie all'applicazione di determinati ossidi metallici sulla superficie del vetro sono in grado di conferire un compromesso tra prestazione termica e efficacia in termini di ingresso di illuminamento.
Al fine delle analisi sono state considerati 6 valori differenti di g, scelti anche in questo caso con salto graduale di 0.1-0.2.

Trasmittanza solare g (-)	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05

Tabella 6.2.3 - Valori di g considerati nel processo di ottimizzazione

Sono state poi sviluppate successivamente delle variazioni sulla percentuale di superficie vetrata disponibile considerando 3 differenti casistiche con scarto del 25% tra un caso e l'altro.
In questo caso, la variazione non era facilmente controllabile all'interno del software di calcolo; per questo motivo sono stati realizzati i corrispondenti 3 modelli geometrici all'interno di OpensStudio.
La modellazione è stata realizzata tramite appositi scripts predefiniti di OpenStudio, grazie al quale è stato possibile intervenire sulla percentuale di vetratura dei diversi orientamenti del modello inserendo in modo diretto il valore di percentuale desiderata.
Il risultato fornito dal programma di modellazione grafica è una superficie vetrata a nastro corrispondente alla percentuale inserita manualmente dall'utente.

Superficie vetrata (%)	25	50	80

Tabella 6.2.4 - Percentuali di superficie trasparente considerate nel processo di ottimizzazione

La seconda parte del lavoro è stata incentrata sul sistema di oscuramento da applicare alle configurazioni ritenute buone dal punto di vista termico grazie al solo intervento dell'involucro.

L'indagine svolta si è basata su tre diversi tipi di schermatura esterna: la griglia microforata, le tende e i sistemi a lamelle.

Per i tre tipi, sono state svolte ulteriori simulazioni facendone variare alcuni parametri propri della soluzione, seguendo il procedimento a cascata che ha caratterizzato tutto il processo di analisi.

I sistemi di oscuramento e le casistiche analizzate sono state le seguenti:

- Lamelle

	r_E	a_E	t_E	r_V	a_V	t_V
bassa riflettanza	0.2	0.8	0	-	-	-
media riflettanza	0.5	0.5	0	-	-	-
alta riflettanza	0.8	0.2	0	-	-	-

Tabella 6.2.5 - Casistiche considerate per le lamelle di oscuramento

- Tende

	r_E	a_E	t_E	r_V	a_V	t_V
1° caso	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.4
2° caso	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
3° caso	0.5	0.4	0.1	0.5	0.4	0.1

Tabella 6.2.6 - Casistiche considerate per le tende di oscuramento

- Schermi

	r_E	r_V
Alluminio	0.5	0.5

Tabella 6.2.7 - Casistica considerata per lo schermo di oscuramento

6.2.1. VARIAZIONE TRASMITTANZA SUPERFICI OPACHE Uop

La riduzione del fabbisogno energetico si può ottenere attraverso un controllo delle trasmittanze delle superfici di involucro.[4]

Per poter verificare il miglioramento del complesso edilizio si è partiti analizzando elemento per elemento in modo tale da comprenderne il contributo all'interno del processo di bilancio energetico.

La prima modifica di prova effettuata è stata la variazione della trasmittanza termica del pacchetto opaco nei tre step precedentemente anticipati, realizzando un grafico per monitorare adeguatamente i valori di fabbisogno termico.

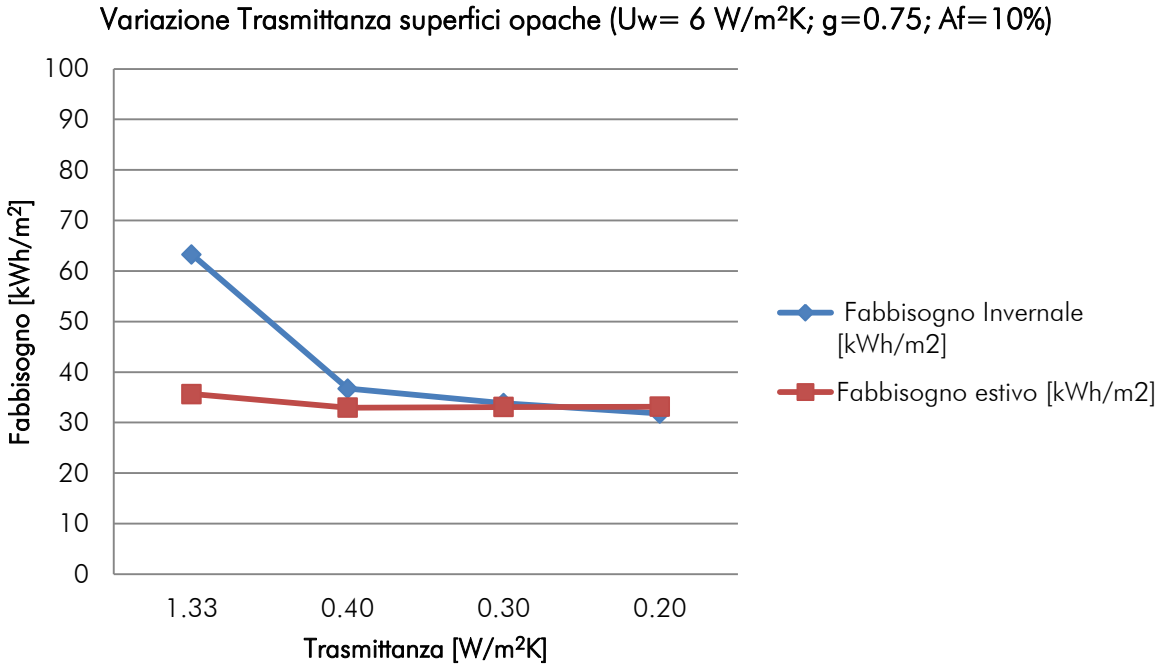


Grafico 6.2.1 - Fabbisogni estivi e invernali, variazione trasmittanza parti opache

U=0.4		U=0.3		U=0.2	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
192889	36.72	177753	33.84	166947	31.78
173067	32.95	173775	33.08	174120	33.15

Tabella 6.2.8 - Fabbisogni estivi e invernali, variazione trasmittanza parti opache

[4] Ihara T, Gustavsen A, Jelle BP. Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. Appl Energy 2015 11/15;158:422-432.

Il grafico mostra una riduzione maggiore del fabbisogno invernale di riscaldamento, pari ad una variazione di percentuale del 50%. Si riscontra invece una riduzione attorno al 7% - 8% del fabbisogno estivo.

Tale decremento nella richiesta di fabbisogno invernale è dovuta essenzialmente al miglioramento complessivo delle componenti opache dell'involucro, le quali, in assenza di variazioni degli altri parametri, rappresentano la componente più influente nel calcolo.

In particolare si può notare un miglioramento del 40% nella prima variazione simulata, che prevede il passaggio dalle condizioni di trasmittanza opaca dello stato di fatto da 1.33 W/m^2K a 0.4 W/m^2K.

Le successive riduzioni di trasmittanza del pacchetto opaco riducono il valore del fabbisogno invernale in modo più graduale seguendo l'andamento iperbolico del grafico, da cui si può notare una variazione non così significante nella riduzione da valori di U=0.3 W/m^2K a U=0.2 W/m^2K.

Si riscontra infatti un miglioramento del fabbisogno invernale pari al 47% in caso di Uop=0.3 W/m^2K e del 50% con Uop=0.2 W/m^2K rispetto alla configurazione iniziale di trasmittanza di involucro.

Questo dato è importante nella valutazione delle successive analisi anche tenendo in considerazione degli aspetti di carattere economico. La variazione di trasmittanza comporta un aumento dei costi di realizzazione a discapito di un miglioramento di non eguale convenienza in termini di prestazioni; occorre quindi effettuare scelte oculate tali da non eccedere inutilmente nei costi di realizzazione dell'intervento.

6.2.2. VARIAZIONE TRASMITTANZA SUPERFICI VETRATE Uw

La sostituzione dei serramenti attuali con serramenti più performanti dal punto di vista dell'isolamento termico comporta una riduzione di trasmittanza delle superfici trasparenti, con un conseguente miglioramento del fabbisogno energetico dell'edificio.[5] Le simulazioni che sono state eseguite hanno avuto come obiettivo la valutazione del contributo delle perdite per trasmissione a seguito di prestazioni più elevate della componente vetrata. La superficie vetrata di riferimento delle analisi è pari al 10%; si valuteranno i risultati rispetto al miglioramento rilevato nella variazione della trasmittanza delle superfici opache.

[5] Fasi MA, Budaiwi IM. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. Energy Build 2015 12/1;108:307-316.

Sono stati quindi analizzati i valori delle 4 casistiche affrontate e sono state confrontate con la situazione energetica dello stato di fatto; si effettueranno successivamente considerazioni anche in base al precedente apporto migliorativo del sistema opaco.

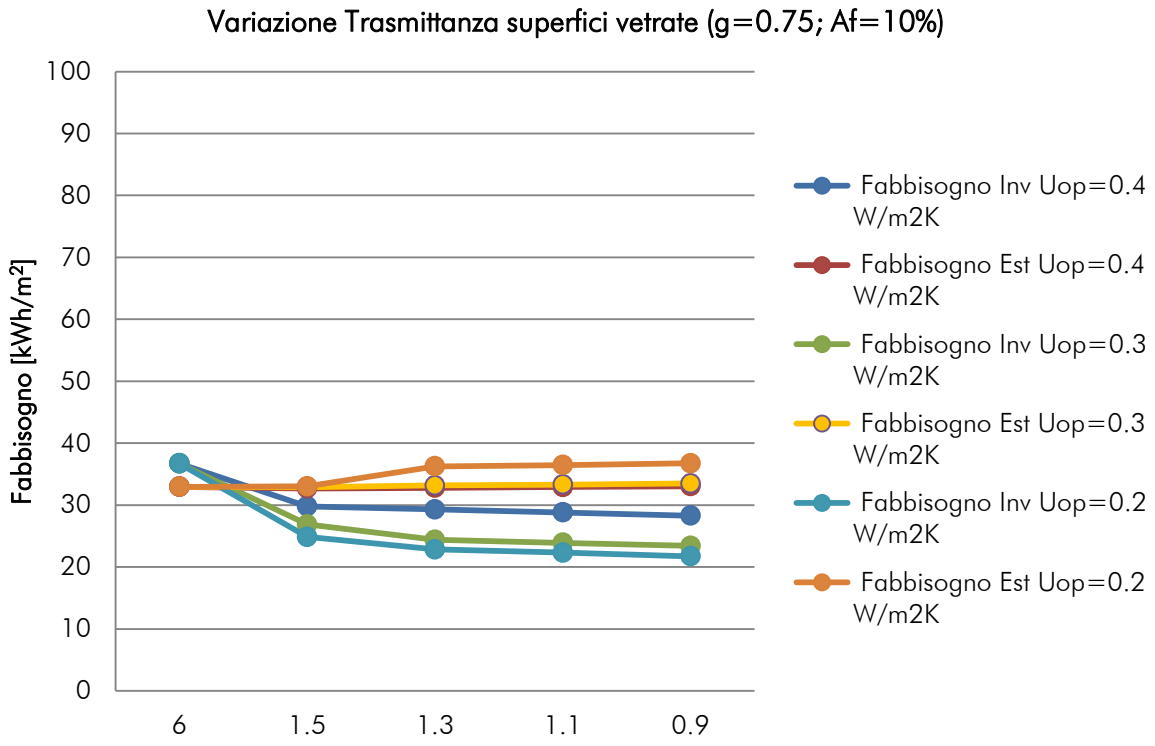


Grafico 6.2.2 - Fabbisogni estivi e invernali, variazione trasmittanza superfici trasparenti

U=0.4 W/m²K							
Uw=1.5 W/m²K		Uw=1.3 W/m²K		Uw=1.1 W/m²K		Uw=0.9 W/m²K	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
156495	29.79	153970	29.31	151350	28.81	148658	28.30
171681	32.68	172306	32.80	172961	32.93	173658	33.06

Tabella 6.2.9 - Fabbisogni estivi e invernali Uop=0.4 W/m²K con variazione trasmittanza superfici trasparenti

U=0.3 W/m²K							
Uw=1.5 W/m²K		Uw=1.3 W/m²K		Uw=1.1 W/m²K		Uw=0.9 W/m²K	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
141181	26.88	128136	24.39	125628	23.91	123008	23.42
172811	32.90	174245	33.17	175036	33.32	175872	33.48

Tabella 6.2.10 - Fabbisogni estivi e invernali Uop=0.3 W/m²K con variazione trasmittanza superfici trasparenti

U=0.2 W/m²K							
Uw=1.5 W/m²K		Uw=1.3 W/m²K		Uw=1.1 W/m²K		Uw=0.9 W/m²K	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
130567	24.86	120050	22.85	117306	22.33	114217	21.74
173520	33.03	190389	36.24	191611	36.48	193011	36.74

Tabella 6.2.11 - Fabbisogni estivi e invernali Uop=0.2 W/m²K con variazione trasmittanza superfici trasparenti

Tenendo fisse le tre condizioni migliorative di trasmittanza delle superfici opache, si sono simulate le diverse combinazioni di trasmittanza delle superfici trasparenti associate ad esse.

Il risultato delle analisi riporta una riduzione del fabbisogno invernale: in particolare, la sostituzione dei serramenti attuali riduce la richiesta energetica di un ulteriore 20% con l'ipotesi di serramento con trasmittanza pari a Uw=1.5 W/m²K. Si ottengono progressivi decrementi rispetto alla situazione del solo miglioramento dell'involucro opaco, diminuendo fino a 0.9 W/m²K il valore di trasmittanza dei serramenti.

Tuttavia a parità di trasmittanza del sistema vetrato, a miglioramenti di fabbisogno invernale non sempre corrispondono anche riduzioni del fabbisogno estivo.

Infatti come si può notare dalle tabelle e dal grafico rappresentato, per valori di Uop pari a 0.2 W/m²K si ottiene un innalzamento dei valori di fabbisogno estivo che raggiungono anche valori percentuali pari al 12% nel caso dei vetri più performanti ipotizzati.

Questo comportamento è dovuto a un accumulo eccessivo di energia interna all'edificio che quest'ultimo non è in grado di smaltire, forzando il sistema di raffrescamento a lavorare a potenze più elevate per il mantenimento delle condizioni di comfort imposte.

L'incremento è meno evidente in caso di valori Uop più alti (0.4-0.3 W/m²K), tale per cui la propensione verso la combinazione caratterizzata dalla trasmittanza opaca intermedia risulta complessivamente ancora la più performante.

6.2.3. VARIAZIONE TRASMITTANZA SOLARE g

Il terzo parametro inserito nel processo di ottimizzazione è stato il solar factor (g). Esso rappresenta un rapporto tra la quantità di energia che il vetro trasmette all'interno dell'ambiente interno e la radiazione incidente su tale superficie vetrata.

Il parametro è quindi inerente alla capacità della superficie trasparente di favorire o ridurre l'ingresso di radiazione termica attraverso l'involucro.

Il procedimento a cascata è stato quindi svolto per tutte le combinazioni precedenti di Uop e di Uw e i dati ottenuti dalle simulazioni verranno di seguito mostrati sotto forma grafica e tabellare; infine si analizzeranno i risultati e si cercherà di individuare un range preliminare di ottimizzazione al fine di giungere ad obiettivi prestazionali favorevoli ad ulteriori e progressive ottimizzazioni.

Poiché il numero di variabili coinvolte inizia ad aumentare, ai fini di una migliore comprensione del comportamento dell'edificio si è preferito distinguere in grafici differenti l'andamento dei fabbisogni estivi ed invernali delle diverse casistiche.

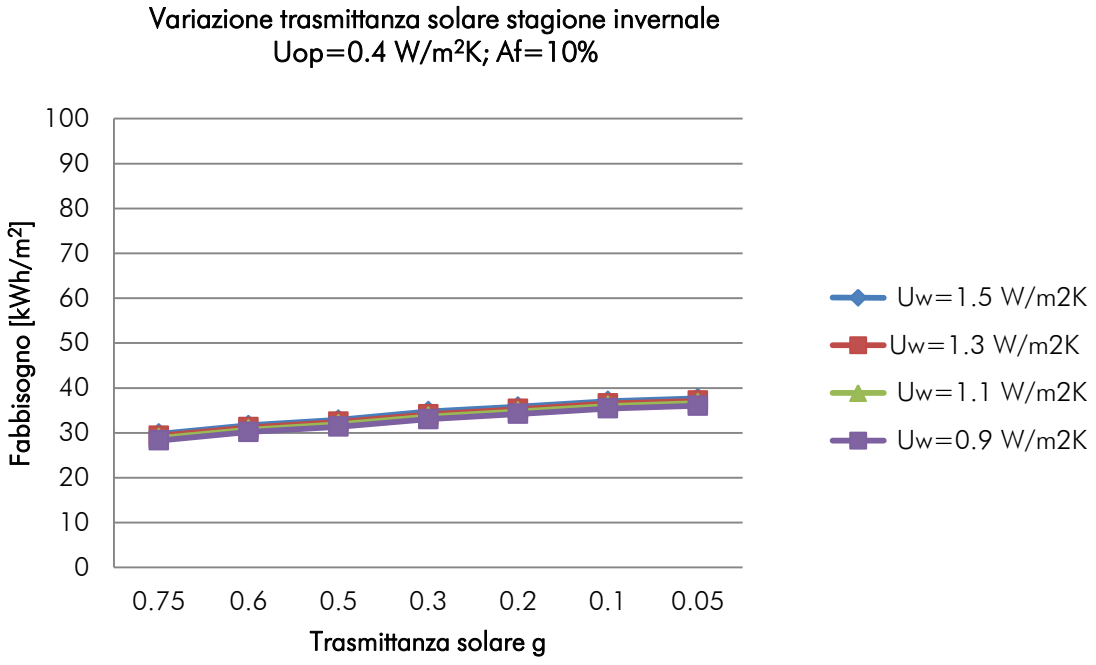


Grafico 6.2.3 - Fabbisogni invernali al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4W/m²K)

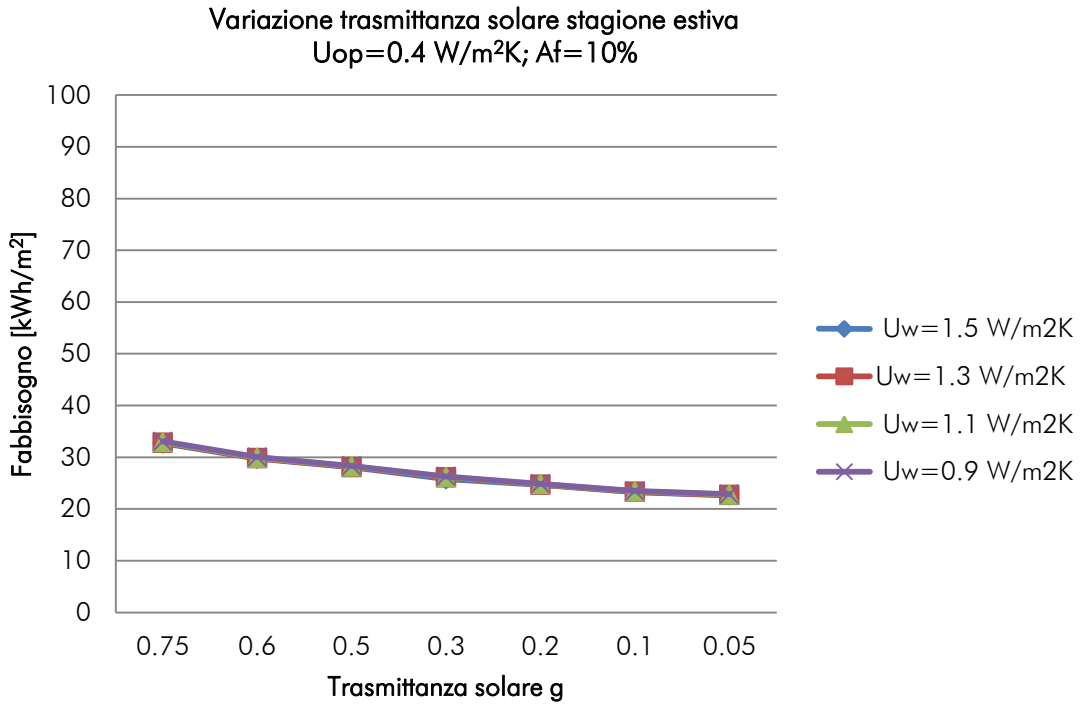


Grafico 6.2.4 - Fabbisogni estivi al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m²K)

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
166486	31.69	172756	32.89	182770	34.79	188045	35.80	194670	37.06	182028	34.65
156058	29.71	147414	28.06	135336	25.76	129408	24.64	122114	23.25	117945	22.45

Tabella 6.2.12 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=1.5 W/m²K)

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
163928	31.21	170289	32.42	179183	34.11	185353	35.29	191892	36.53	195097	37.14
156572	29.81	147703	28.12	137164	26.11	129808	24.71	122520	23.32	119245	22.70

Tabella 6.2.13 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=1.3 W/m²K)

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
161264	30.70	167575	31.90	176433	33.59	182581	34.76	189072	35.99	192220	36.59
157120	29.91	148220	28.22	137628	26.20	130211	24.79	122914	23.40	119650	22.78

Tabella 6.2.14 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=1.1 W/m²K)

Uop=0.4 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
158497	30.17	164789	31.37	173597	33.05	179706	34.21	186136	35.43	189253	36.03
157675	30.02	148783	28.32	138145	26.30	130656	24.87	123350	23.48	120086	22.86

Tabella 6.2.15 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.4 W/m2K, Uw=0.9 W/m²K)

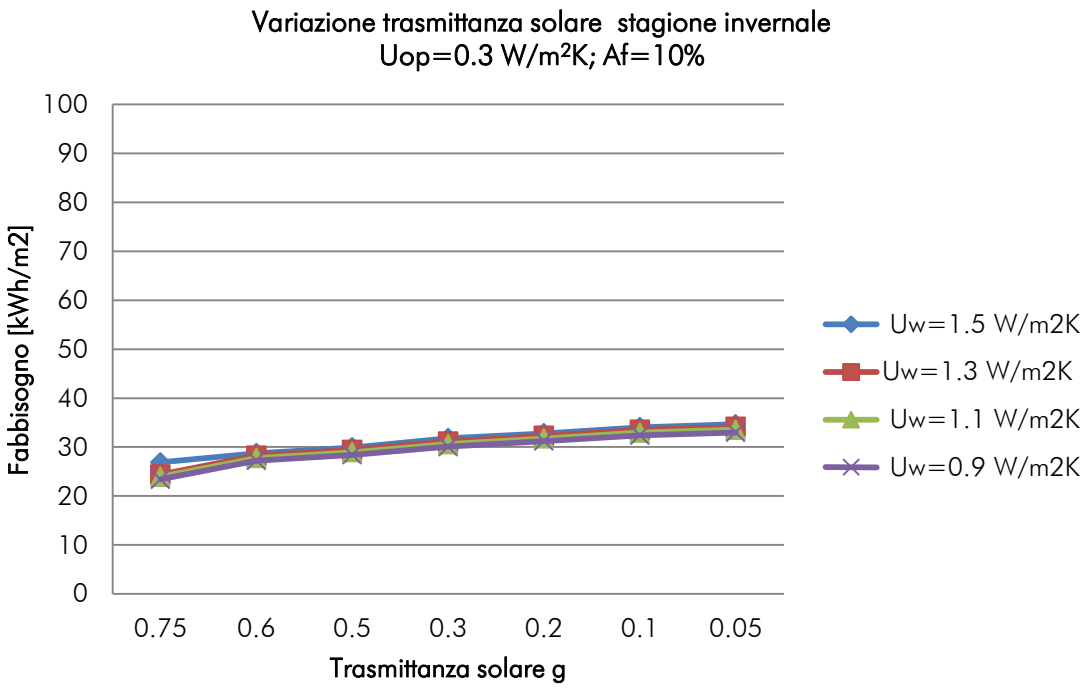


Grafico 6.2.5 - Fabbisogni invernali al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m²K)

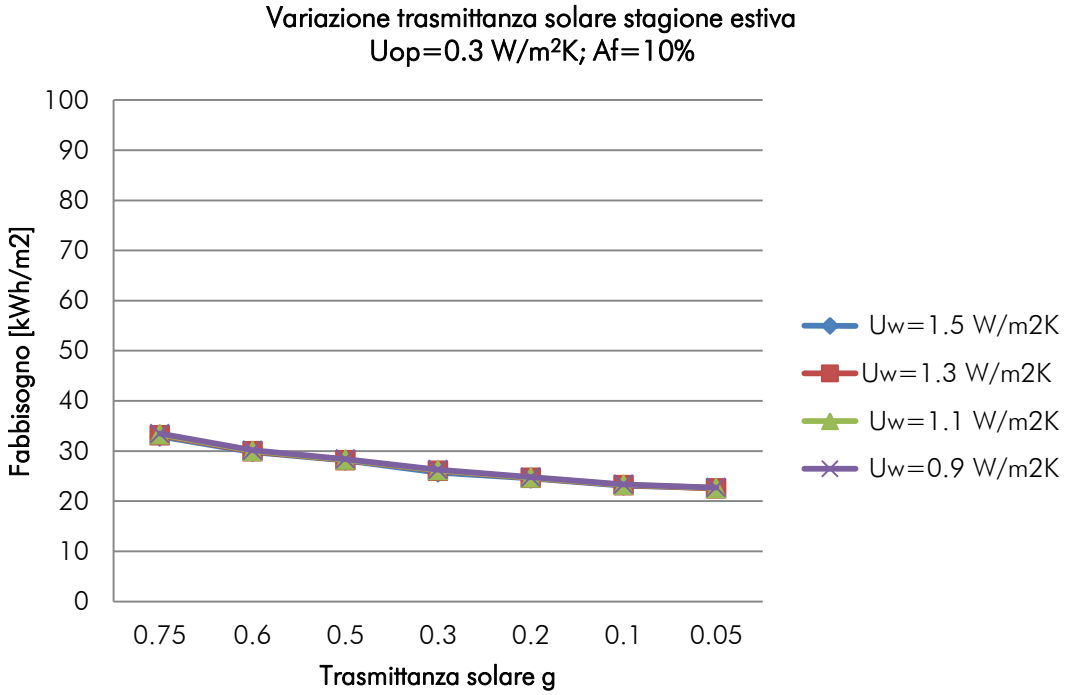


Grafico 6.2.6 - Fabbisogni estivi al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m²K)

Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
150939	28.73	157120	29.91	167031	31.80	172247	32.79	178803	34.04	197931	37.68
156586	29.81	147622	28.10	135064	25.71	128878	24.53	121353	23.10	118825	22.62

Tabella 6.2.16- Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K)

Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
148378	28.25	154642	29.44	163475	31.12	169542	32.28	176000	33.50	179183	34.11
157161	29.92	147956	28.17	136942	26.07	129308	24.62	121786	23.18	118397	22.54

Tabella 6.2.17 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K)

Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
145722	27.74	152011	28.94	160717	30.59	166764	31.75	173167	32.96	176281	33.56
157764	30.03	148533	28.28	137467	26.17	129781	24.71	122220	23.27	118839	22.62

Tabella 6.2.18 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K)

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
143072	27.24	149214	28.41	157939	30.07	163970	31.21	170220	32.40	173295	32.99
158422	30.16	149164	28.39	138036	26.28	130272	24.80	122681	23.36	119322	22.71

Tabella 6.2.19 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K)

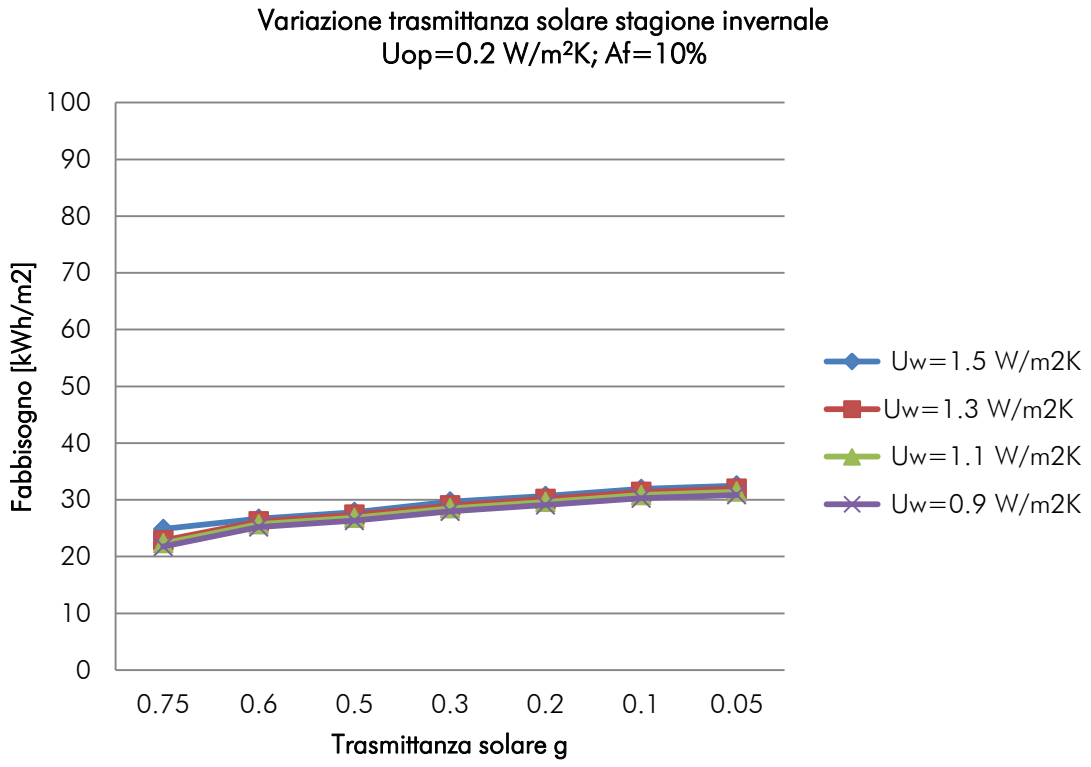


Grafico 6.2.7 - Fabbisogni invernali al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m²K)

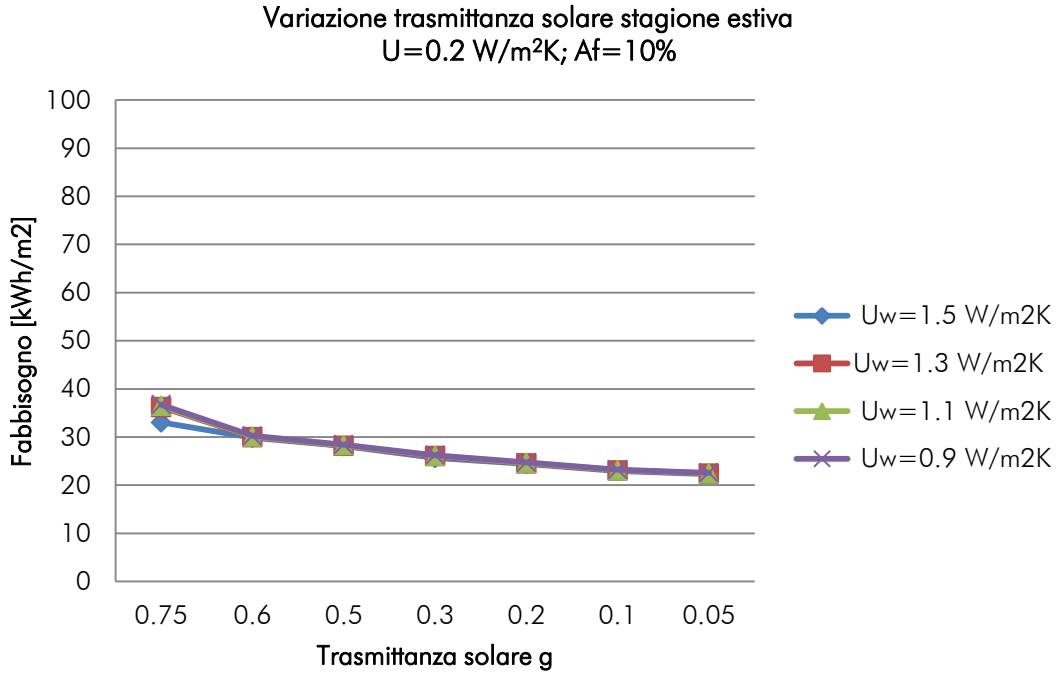


Grafico 6.2.8 - Fabbisogni estivi al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m²K)

Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
140097	26.67	146164	27.83	155950	29.69	161120	30.67	167595	31.91	170783	32.51
156853	29.86	147620	28.10	134720	25.65	128353	24.43	120611	22.96	117145	22.30

Tabella 6.2.20 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K)

Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
137525	26.18	143689	27.35	152414	29.01	158411	30.16	164803	31.37	167942	31.97
157456	29.98	147981	28.17	136661	26.02	128833	24.53	121072	23.05	117614	22.39

Tabella 6.2.21 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K)

Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
134964	25.69	140986	26.84	149653	28.49	155636	29.63	161975	30.83	165050	31.42
158128	30.10	148603	28.29	137214	26.12	129320	24.62	121556	23.14	118083	22.48

Tabella 6.2.22 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K)

Uop=0.2 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, Af=10%											
g=0.6		g=0.5		g=0.3		g=0.2		g=0.1		g=0.05	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
132300	25.19	138206	26.31	146828	27.95	152767	29.08	159031	30.28	162067	30.85
158847	30.24	149283	28.42	137814	26.24	129842	24.72	122058	23.24	118600	22.58

Tabella 6.2.23 - Fabbisogni al variare della trasmittanza solare g (Uop=0.2 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K)

Analizzando i valori ottenuti si può distinguere un comportamento analogo per tutte le casistiche esaminate:

a parità di fattore solare, il contributo di g non incide sulla situazione globale del fabbisogno energetico estivo e/o invernale al variare della trasmittanza delle superfici trasparenti; questa situazione è interpretabile come una insufficiente quantità di superficie vetrata tale da poter avvertire variazioni significative (superficie vetrata 10%, superficie opaca 90%).

Si può inoltre notare come tutti i casi simulati presentino ulteriori caratteristiche simili; riducendo gradualmente il fattore solare, il fabbisogno invernale tende gradualmente ad aumentare in modo quasi lineare raggiungendo aumenti pari al 26%-27% nelle casistiche con g=0.05 rispetto alla casistica standard g=0.75. Il fenomeno riscontrato rappresenta correttamente il comportamento reale dell'edificio in quanto un ridotto ingresso degli apporti solari entranti nell'edificio corrisponde a maggior fabbisogno richiesto dall'edificio per raggiungere le temperature interne di set-point.

Al variare della trasmittanza delle componenti opache si riscontra un ulteriore aumento del fabbisogno invernale (31% in più rispetto a g=0.75 nel caso di parità di Uop=0.2 W/m²K), ma tale variazione non è così influente ai fini del fabbisogno.

Differente situazione si osserva invece nel periodo estivo nel quale si ottiene una diminuzione di fabbisogno termico dovuto al minor contributo degli apporti solari entranti.

Si rileva infatti una diminuzione che segue una funzione iperbolica con valori percentuali tra il 31%-32% nel caso dei g più piccoli, proporzionalmente alla propria casistica di trasmittanza di superficie opaca.

Un compromesso che si potrebbe ottenere da tali analisi sarebbe lavorare con g intermedi, compresi tra 0.2 e 0.3, tali da non avere inversioni di comportamento rilevanti in entrambe le stagioni.

6.2.4. VARIAZIONE SUPERFICIE VETRATA (%Af)

La componente vetrata possiede diverse caratteristiche che influiscono sul risultato complessivo del fabbisogno termico annuale.

La quantità di superficie vetrata è un altro parametro che incide fortemente sul comportamento complessivo dell'edificio. Tramite le superfici trasparenti si è in grado di aumentare o diminuire l'ingresso degli apporti solari garantendo inoltre un maggiore utilizzo di luce naturale con una conseguente riduzione dei consumi elettrici dovuti all'illuminazione artificiale[6], un maggiore contributo di apporti solari invernali. I benefici appena esposti vanno a discapito tuttavia di un decremento della trasmittanza complessiva dell'involucro (in generale i serramenti e le superfici vetrate sono il punto debole dell'involucro se paragonati alle soluzioni più performanti delle superfici opache), un'ulteriore attenzione al controllo degli apporti solari estivi e maggiore possibilità di abbagliamento.[7]

Diventa quindi importante effettuare scelte che raggiungano un buon compromesso tra i vantaggi e gli svantaggi che il sistema vetrata apporta nella progettazione di un edificio energeticamente efficiente.[8]

Di seguito verranno esaminate le 3 casistiche scelte, corrispondenti ad Af=25%-50%-80%, anche in funzione della nuova riconfigurazione a open space che si vuole conferire all'edificio riqualificato.

A titolo esplicativo e per similarità delle funzioni del comportamento dei fabbisogni termici non verranno riportati di seguito tutti i grafici ottenuti dalle simulazioni, ma verranno esaminate due configurazioni per analizzare e spiegare il comportamento generale che regola gli andamenti di tali fabbisogni. Per la consultazione di tutte le rappresentazioni in forma grafica e tabellare si rimanda agli allegati a questa tesi.

---

[6] Boyano A, Hernandez P, Wolf O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. Energy Build 2013 10;65:19-28.

[7] Suk JY, Schiler M, Kensek K. Absolute glare factor and relative glare factor based metric: Predicting and quantifying levels of daylight glare in office space. Energy Build 2016 10/15;130:8-19.

[8] Hee WJ, Alghoul MA, Bakhtyar B, Elayeb O, Shameri MA, Alrubaih MS, et al. The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015 2;42:323-343.

Verrà di seguito esposta la condizione con Uop=0.4 W/m2K e Uw=1.5 W/m2K con relativo grafico e tabelle e la condizione con Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K.

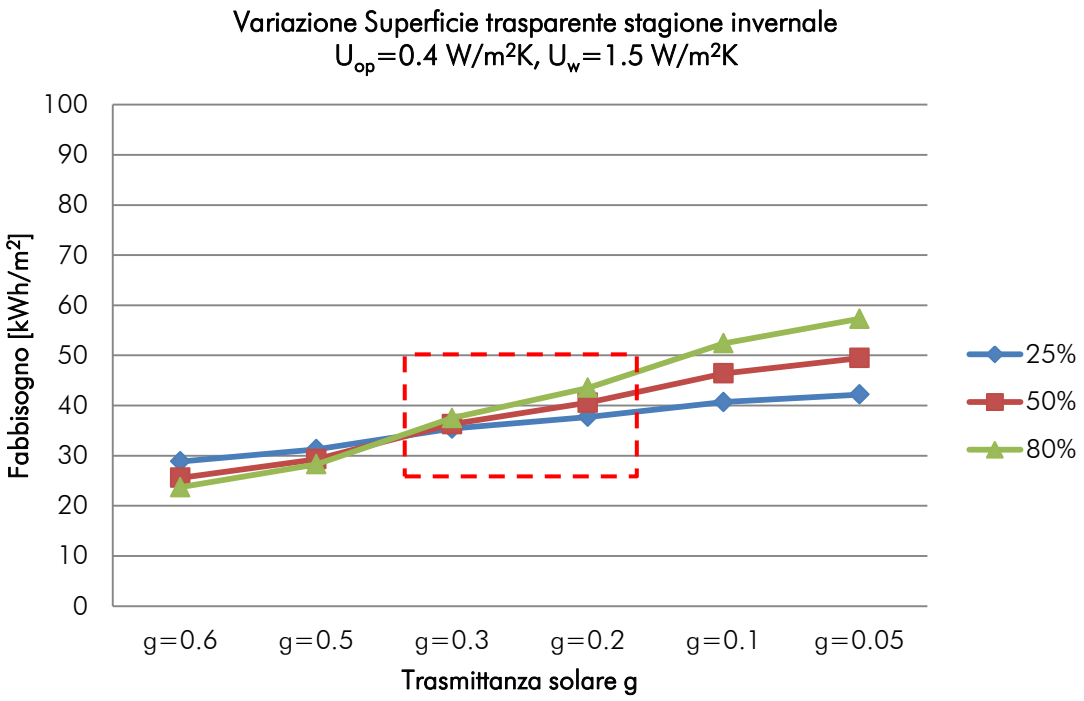


Grafico 6.2.9 - Fabbisogno invernale con variazione superficie vetrata (Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K)

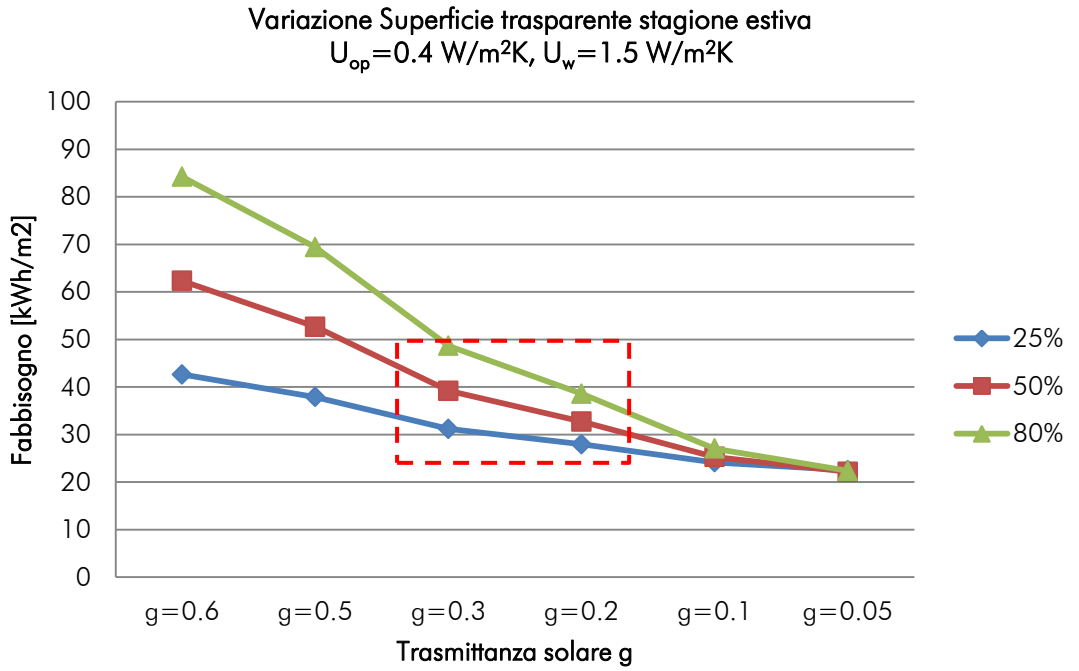


Grafico 6.2.10 - Fabbisogno estivo con variazione superficie vetrata (Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K)

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, g=0.6					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
151592	28.86	134375	25.58	124531	23.71
223906	42.63	327425	62.34	442461	84.23

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, g=0.5					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
164253	31.27	153917	29.30	148578	28.28
199000	37.88	276731	52.68	364492	69.39

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, g=0.3					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
185967	35.40	190675	36.30	196983	37.50
163789	31.18	205939	39.20	255692	48.68

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, g=0.2					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
198078	37.71	213092	40.57	228750	43.55
146789	27.94	171906	32.73	202722	38.59

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, g=0.1					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
213772	40.69	243750	46.40	275347	52.42
126836	24.14	132850	25.29	142097	27.05

Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K, g=0.05					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
221700	42.20	259925	49.48	300947	57.29
118120	22.49	116464	22.17	117470	22.36

Tabella 6.2.24 - Variazione percentuale superficie vetrata (Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K)

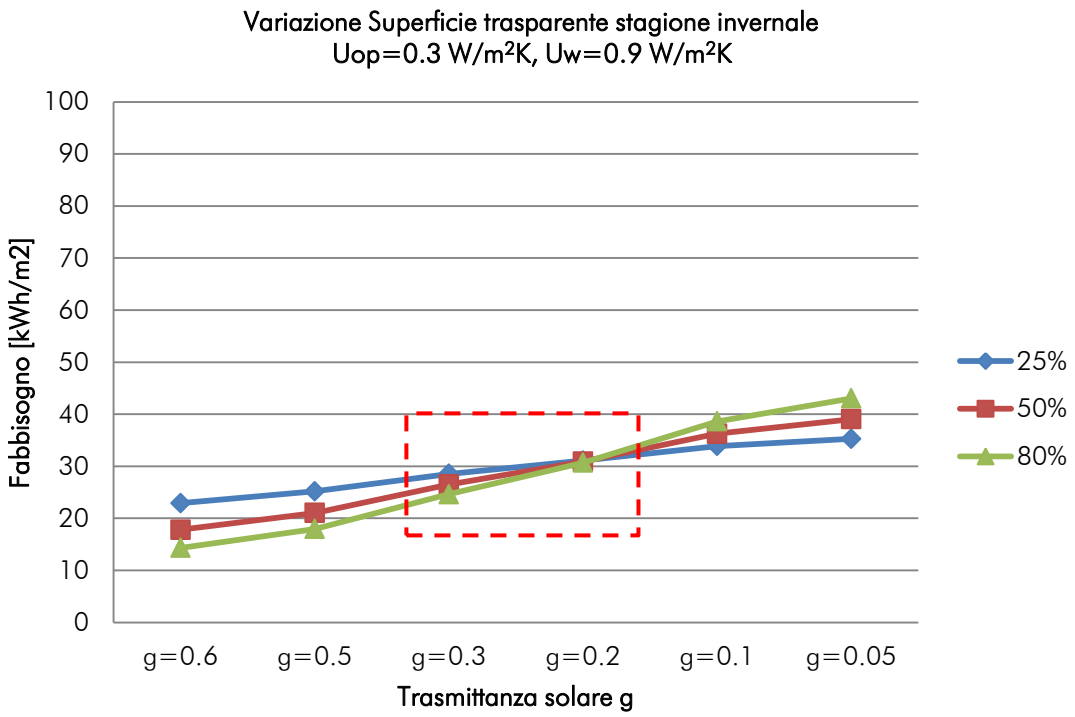


Grafico 6.2.11 - Fabbisogno invernale con variazione superficie vetrata (Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K)

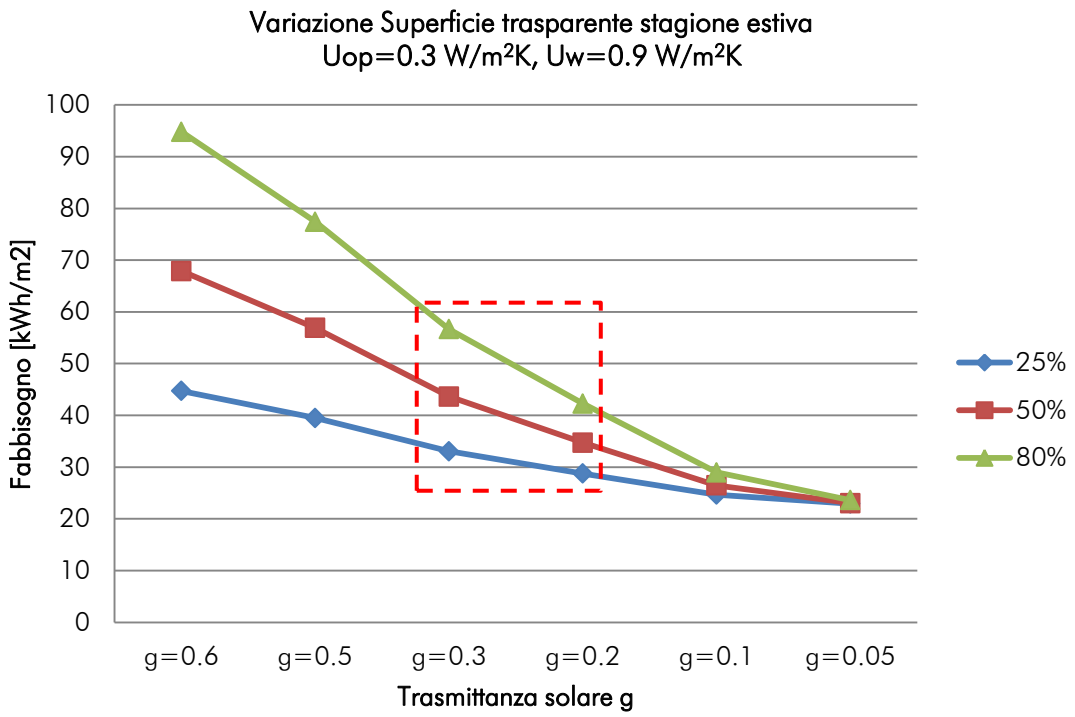


Grafico 6.2.12 - Fabbisogno estivo con variazione superficie vetrata (Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K)

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, g=0.6					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
120314	22.90	93511	17.80	75250	14.33
234967	44.73	356584	67.88	498050	94.81

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, g=0.5					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
132189	25.16	110453	21.03	94322	17.96
207464	39.49	299014	56.92	406709	77.42

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, g=0.3					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
149831	28.52	139139	26.49	129389	24.63
173670	33.06	229289	43.65	297611	56.66

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, g=0.2					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
163197	31.07	162322	30.90	161192	30.69
151100	28.76	182439	34.73	222034	42.27

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, g=0.1					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
177956	33.88	190386	36.24	202783	38.60
129678	24.69	138981	26.46	152261	28.99

Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K, g=0.05					
A_f=25%		A_f=50%		A_f=80%	
kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
185222	35.26	205111	39.05	226150	43.05
120458	22.93	120981	23.03	124095	23.62

Tabella 6.2.25 - Variazione percentuale superficie vetrata (Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K)

Questo tipo di analisi ha permesso di evidenziare e di determinare quale fosse il valore di g limite tale per cui vi fosse una inversione di tendenza per quanto riguarda la convenienza in termini di fabbisogno invernale al variare di tale area finestrata.

Questo valore infatti evidenzia il punto di inversione di convenienza delle ampie superfici vetrate.

In particolare, nella maggior parte dei casi il valore è risultato aggirarsi attorno a g=0.2-0.3.

Ciò che si è riscontrato è quindi una maggiore convenienza di superfici vetrate di grandi dimensioni nelle casistiche invernali con g superiori a 0.2, raggiungendo un sufficiente compromesso del fabbisogno estivo considerando g più vicino al valore limite.

La convenienza delle grandi superfici vetrate (Af=80%), in questo range di trasmittanza solare, raggiunge riduzioni di fabbisogno che raggiungono valori pari al 15% rispetto ad una percentuale vetrata Af=25% e pari al 18% rispetto alla situazione dello stato di fatto (Af=10%) a parità di g=0.3

Per g molto piccoli al contrario, un'elevata percentuale vetrata comporta fabbisogni invernali sempre crescenti in quanto essendo maggiore la quantità di involucro controllata dal parametro di trasmittanza solare, risulta ridotto l'ingresso di apporto solare durante la stagione invernale; si rilevano aumenti di fabbisogno che raggiungono il 20% rispetto alle piccole percentuali vetrate (Af=25%) .

Il caso estivo evidenzia invece come al diminuire di g le tre variazioni di percentuale trasparente tendano allo stesso valore, pari a 22-23 kWh/m^2 qualunque sia la casistica esaminata.

Questo dato esprime la forte dipendenza del fabbisogno estivo dal valore di trasmittanza solare nel caso quest'ultimo raggiunga valori tendenti a 0, corrispondente alla totale assenza di ingresso di apporti solari all'interno dell'ambiente.

6.2.5. VERIFICHE DI ILLUMINAMENTO

Nella scelta della configurazione adatta di percentuale vetrata e relativi parametri di trasmittanza solare si è inoltre considerato il valore di illuminamento degli interni nelle diverse configurazioni vetrate.

Il procedimento alla base del calcolo di illuminamento è stato attuato assegnando due punti di controllo situati distanti 25 m l'uno dall'altro nel corpo alto e 20 m nel corpo basso ad una distanza di almeno 2 m dalle facciate vetrate. Tali punti di controllo sono stati posti all'interno di ogni piano, rappresentate la zona termica nel caso di calcoli energetici, in grado di rilevare i valori di illuminamento in lux.

Sono state specificati inoltre dei valori limite per quanto riguarda l'indice di abbagliamento che sarebbero potuti verificarsi all'interno degli ambienti: tale limite è stato ipotizzato pari a 22, valore considerato sopportabile dai lavoratori in caso di attività di ufficio.

Activity or Zone Type	Maximum Allowable DGI
Art Galleries	16
Factories: Rough work	28
Factories: Engine assembly	26
Factories: Fine assembly	24
Factories: Instrument assembly	22
Hospital wards	18
Laboratories	22
Museums	20
Offices	22
School classrooms	20

Fig. 6.1 - Valori raccomandati di massimo valore di indice di abbagliamento (DGI- Discomfort Glare Index)

La scelta ottimale si è basata quindi sul verificare la presenza del valore di progetto, considerato pari 500 lux sul piano di lavoro posto a 0.80 m da terra, ai diversi piani dell'edificio.

Queste considerazioni sono state effettuate ipotizzando infatti la presenza di grandi spazi open space, che generalmente richiedono ampie superfici vetrate per fornire un corretto illuminamento nelle zone più interne.

Tramite questo metodo si possono calcolare i livelli di illuminamento per determinare la quantità di luce elettrica riducibile nei diversi ambienti. Il livello di illuminamento in una zona dipende da diversi fattori che vanno dalle condizioni di cielo, posizione del sole, punto di calcolo; vi è una dipendenza anche in base al posizionamento, l'estensione vetrata e la trasmittanza dei serramenti; la presenza di sistemi di oscuramento e anche i valori di riflettanza delle superfici interne sono altri fattori che influiscono sul calcolo.

È stata quindi effettuata una verifica preliminare dei valori di illuminamento con valori di trasmittanza luminosa pari all'80%.

Il software EnergyPlus sfrutta per tale calcolo il "Radiosity method" nel quale viene ipotizzata la finestra come una superficie diffondente, calcolando la sua luminanza in funzione della radiazione incidente, ricavata dal file climatico inserito all'interno del programma di simulazione stesso.

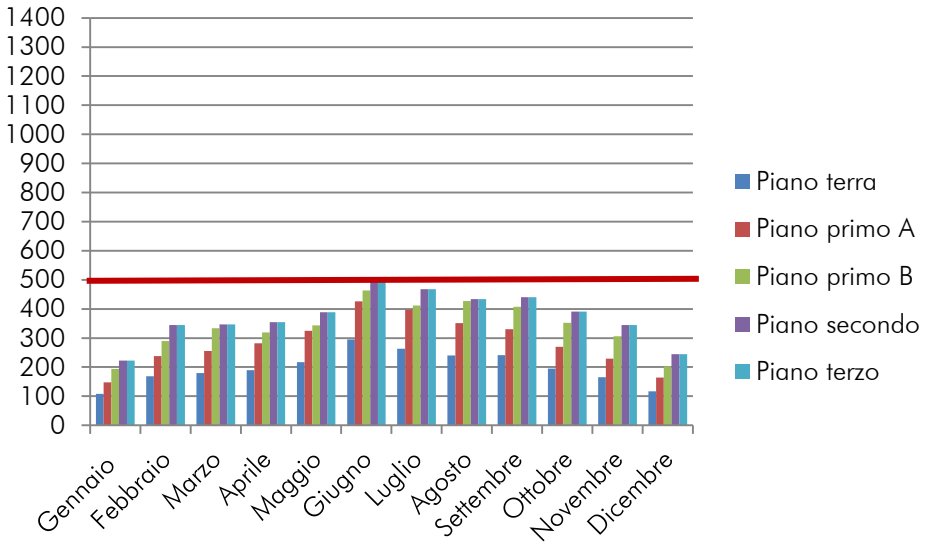


Grafico 6.2.13 - Valori di illuminamento (lux) con Af=25%

	Illuminamento (lux)				
	Piano terra	Piano primo A	Piano primo B	Piano secondo	Piano terzo
Gennaio	107.87	147.96	194.24	222.46	222.46
Febbraio	168.95	237.36	289.77	344.07	344.07
Marzo	179.05	255.35	333.72	346.73	346.73
Aprile	189.54	281.46	319.4	354.54	354.54
Maggio	217.31	325.32	343.13	389.05	389.05
Giugno	295.14	426.43	463.44	494.78	494.78
Luglio	262.92	397.03	411.18	467.66	467.66
Agosto	239.97	351.53	426.64	434.22	434.22
Settembre	240.8	330.05	407.3	439.81	439.81
Ottobre	194.78	270.33	352.01	391.16	391.16
Novembre	165.1	228.54	305.63	344.83	344.83
Dicembre	117.33	163.87	202.2	244.75	244.75

Tabella 6.2.26 - Illuminamento Af=25%

Quello che si riscontra dal grafico è una insufficiente capacità del sistema vetrato di garantire i valori di progetto pari a 500 lux attraverso l'utilizzo di luce naturale durante tutto il periodo annuale.

Questo significa che per sopperire ad una richiesta di progetto superiore a quella fornita sarà necessario utilizzare illuminamento artificiale anche nel periodo tra Giugno e Agosto.

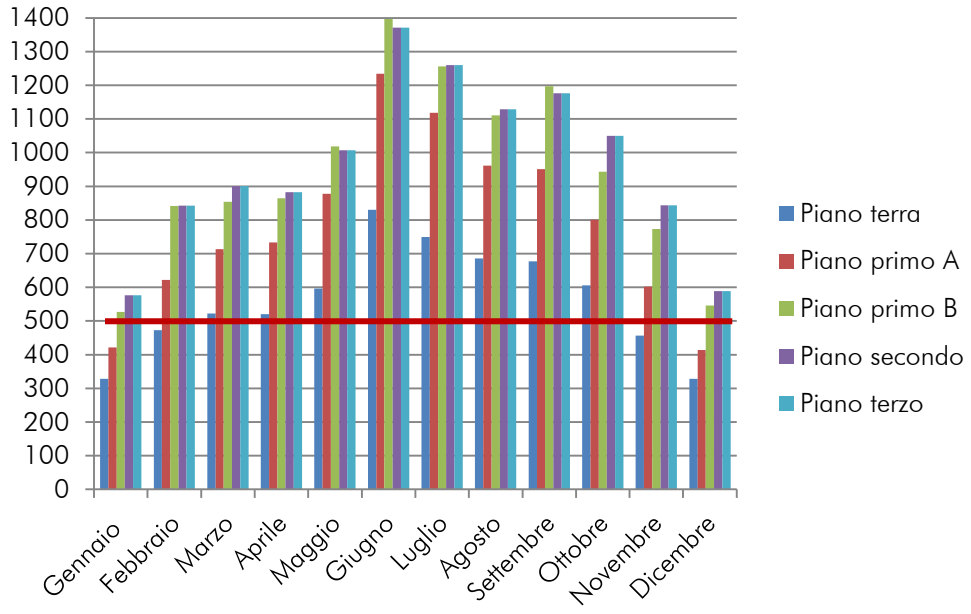


Grafico 6.2.14 - Valori di illuminamento (lux) con Af=50%

	Illuminamento (lux)				
	Piano terra	Piano primo A	Piano primo B	Piano secondo	Piano terzo
Gennaio	328.23	421.52	526.94	576.83	576.83
Febbraio	472.48	622.05	842.06	843.02	843.02
Marzo	522.48	712.83	853.8	900.82	900.82
Aprile	520.06	733.06	864.63	882.68	882.68
Maggio	596.74	878.01	1018.8	1007.1	1007.1
Giugno	829.82	1234.6	1397	1371.3	1371.3
Luglio	749.12	1118.6	1256.4	1260.1	1260.1
Agosto	685.54	961.09	1110.5	1128.4	1128.4
Settembre	677.59	951.3	1197.6	1175.8	1175.8
Ottobre	605.46	800.77	943.21	1049.8	1049.8
Novembre	456.6	601.63	773.24	843.52	843.52
Dicembre	328.15	414.16	545.53	589.15	589.15

Tabella 6.2.27 - Illuminamento Af=50%

I valori di illuminamento ottenuti con una percentuale di superficie vetrata risultano garantire i 500 lux di progetto ad esclusione dei mesi invernali di Gennaio e Dicembre dove i valori si aggirano nel range tra 320-420 lux.

Questa configurazione di illuminamento risulta sufficiente e verrà quindi presa in considerazione nelle successive ottimizzazioni del sistema edilizio valutando pertanto anche i fabbisogni termici invernali ed estivi.

Va tenuto presente che la configurazione è stata simulata in completa assenza di sistemi di oscuramento e con valore di g pari a 0.6, pertanto la soluzione risulterebbe accettabile in termini di illuminamento ma non sarebbe possibile un controllo dinamico degli apporti entranti.

Introducendo infatti eventuali sistemi di oscuramento esterno si ottengono valori di illuminamento ben al di sotto del valore di progetto di 500 lux soprattutto nel periodo invernale nel quale il sistema di oscuramento dovrebbe essere completamente assente.

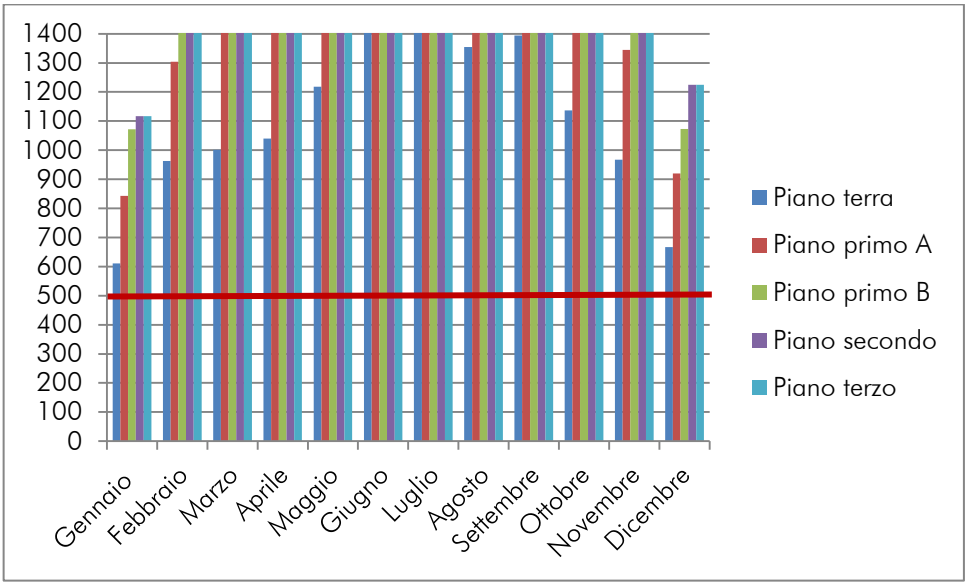


Grafico 6.2.15 - Valori di illuminamento (lux) con Af=80%

	Illuminamento (lux)				
	Piano terra	Piano primo A	Piano primo B	Piano secondo	Piano terzo
Gennaio	610.39	843.03	1072.1	1116.7	1116.7
Febbraio	963.15	1303.9	1537.6	1672.1	1672.1
Marzo	1001.9	1412.2	1685.7	1703	1703
Aprile	1039.4	1516.9	1725.7	1747.2	1747.2
Maggio	1218.4	1796.5	2043.9	1990.8	1990.8
Giugno	1606.1	2280.6	2479.9	2475.9	2475.9
Luglio	1465.7	2113	2320	2320.4	2320.4
Agosto	1354.2	1976.1	2265.2	2227.7	2227.7
Settembre	1393.7	1930.8	2064.5	2274.3	2274.3
Ottobre	1136.4	1584.7	1855.2	1975.1	1975.1
Novembre	966.73	1344.6	1424.6	1783.7	1783.7
Dicembre	667.31	919.67	1073.2	1225	1225

Tabella 6.2.28 - Illuminamento Af=80%

La configurazione rappresentata (Af=80%) fornisce valori che raggiungono valori di illuminamento che superano i 2000 lux nella stagione estiva e valori che variano tra i 610 e 1200 lux nelle condizioni invernali meno favorevoli.

Tuttavia tale combinazione di percentuale vetrata, precedentemente analizzata, presenta le migliori prestazioni in termini di fabbisogno invernale a parità di tutti gli altri parametri coinvolti (Uop, Uw e g).

La regolazione del fabbisogno termico dovuto agli alti apporti solari estivi e gli elevati valori di illuminamento (seppur con indici di abbagliamento al di sotto di 22) è ottenibile mediante l'utilizzo di un sistema di oscuramento.

Attraverso tale sistema, ci si concentrerà sul puntare alla massima valorizzazione degli apporti solari invernali ma al contempo un controllo di questi ultimi nella stagione estiva.

Assenza schermature				
Uw	g	τ_v	ρ_{pav}	ρ_{muri}
0.9	0.6	0.8	0.5	0.1

Tabella 6.2.29 - Condizioni per calcolo di illuminamento delle configurazioni di percentuale vetrata

7. ANALISI SISTEMI DI OSCURAMENTO

Tenendo conto di tutti i risultati precedentemente ottenuti si è proceduto ad utilizzare diverse soluzioni di schermatura solare al fine di avere un maggior controllo dell'elevato fabbisogno estivo di alcune casistiche ritenute molto favorevoli per la stagione invernale.

Infatti, prendendo in considerazione superfici vetrate sempre più ampie, a ridotti fabbisogni invernali si contrapponevano valori non ottimali di fabbisogno estivo, tali per cui è stato necessario intervenire con un controllo adeguato.

L'obiettivo prefissato è stato infatti quello di puntare ad avere le prestazioni dei fabbisogni invernali il più possibile vicini alle casistiche con g alti (g=0.5-0.6) e sfruttare le schermature solari per ottenere circa i medesimi valori estivi delle casistiche che prevedevano g piuttosto bassi (inferiori a 0.3).

Le tipologie di oscuramento che sono state analizzate per le ottimizzazioni successive sono state 3: sono state trattate le carattestiche del sistema a lamelle di cui si sono analizzate le caratteristiche di riflettanza; le tende, analizzandone parametri sia di tipo energetico che visibile e infine le reti a maglia metallica.

La configurazione quindi di partenza per l'ottimizzazione attraverso il sistema di oscuramento più adatto è la seguente:

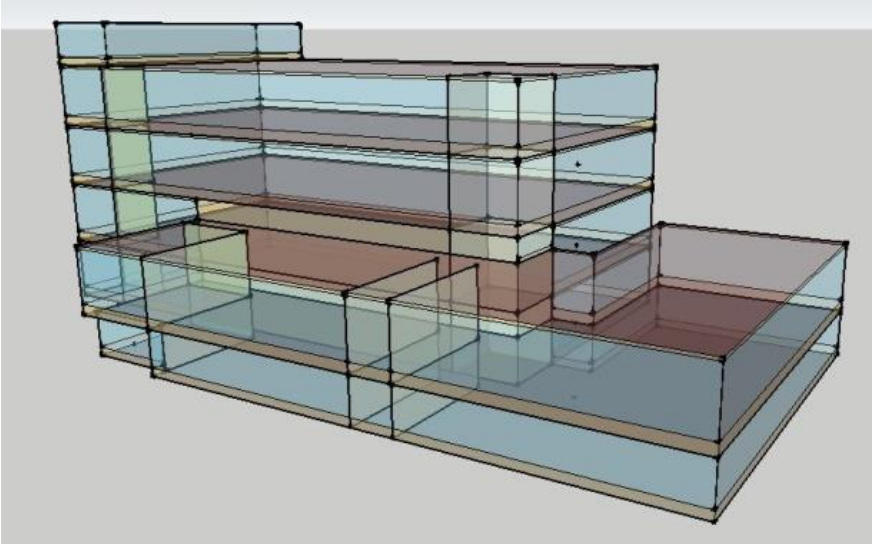


Fig. 7.1 - Modello energetico tramite OpenStudio (Af=80%)

A_f=80%	
kWh	kWh/m^2
129389	24.63
297611	56.66

Tabella 6.2.1 - Condizioni di partenza per l'ottimizzazione tramite schermature

7.1. LAMELLE

L'oscuramento a lamelle è una soluzione spesso utilizzata per affrontare problematiche di forte soleggiamento e di alti fabbisogni termici estivi.

La sua efficacia risulta sempre più evidente posizionandola sul lato esterno del vetro in modo tale che funga da prima barriera alle radiazioni solari.[9]

L'analisi delle lamelle è stata effettuata anch'essa tramite approccio parametrico.

Il primo parametro che si è andato ad analizzare è stato il valore di riflettanza delle lamelle stesse:

in particolare si sono indagati i comportamenti di 3 diversi valori di riflettanza (0.2 – 0.5 – 0.8) corrispondenti rispettivamente a bassa, media e alta riflettanza all'interno del software di simulazione.

7.1.1. VARIAZIONE RIFLETTANZA E INCLINAZIONE LAMELLE

A scopo esplicativo, al fine di mostrarne il comportamento energetico è stato mostrata la casistica esposta di seguito:

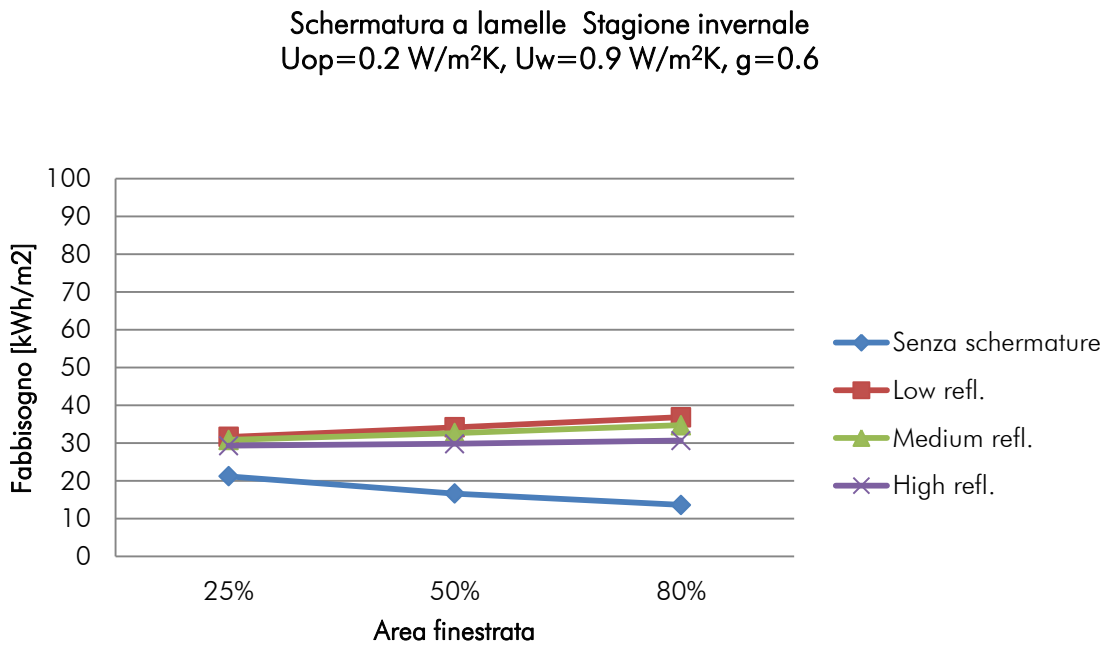


Tabella 7.1.1 - Variazione di riflettanza lamelle stagione invernale

[9] Freewan AAY. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. Solar Energy 2014 4;102:14-30.

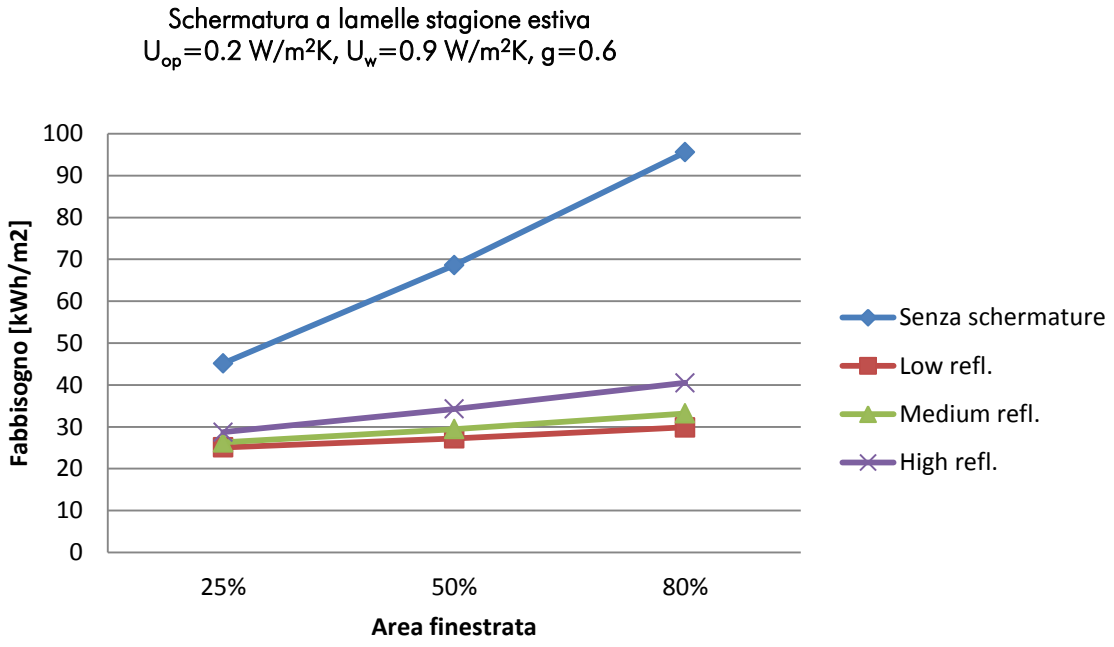


Tabella 7.1.2 – Variazione di riflettanza lamelle stagione estiva

I grafici realizzati hanno permesso di stabilire la convenienza di un sistema di oscuramento fisso o dinamico in funzione dell'area finestrata.

La convenienza di avere un sistema di tipo dinamico è sempre più evidente all'aumentare della superficie vetrata, in quanto lo scarto rispetto ad un sistema simulato in assenza di schermature aumenta; considerando lamelle a bassa riflettanza si raggiungono scarti che toccano il 170% in caso di g pari a 0.6 e superficie vetrata pari all'80% nella stagione invernale e riduzioni pari al 70% in stagione estiva.

Questo fenomeno risulta meno accentuato intervenendo anche sul valore di g:

si osserva infatti un aumento del 62% del fabbisogno invernale in caso di riduzione di g pari a 0.3 e una riduzione del 52% del fabbisogno estivo.

L'intervento su g, pur mitigando parzialmente lo sbilanciamento di fabbisogni estivi ed invernali, suggerisce in ogni caso una convenienza maggiore di un sistema di oscuramento dinamico per involucri ad alta percentuale vetrata.

La necessità di dinamicità del sistema risulta gradualmente meno alta in casistiche con percentuali di superficie vetrata bassa:

si registrano aumenti di fabbisogno pari al 40% di fabbisogno invernale e riduzioni del 40% di fabbisogno estivo nelle casistiche con g pari a 0.6.

I dati ricavati permettono quindi di affermare come per alti valori di g (0.6-0.5) la scelta di adottaren n sistema dinamico risulti più efficace anche per superfici vetrate di piccole dimensioni; la riduzione della trasmittanza solare g potrebbe invece ridurre l'efficacia di un sistema dinamico.

Tale tipo di analisi non è stato svolto ai fini di questa tesi in quanto le soluzioni a bassa percentuale vetrata sono state scartate per motivi di illuminamento non idoneo alle condizioni funzionali e prestazionali richieste da progetto.

Tuttavia tale affermazione è stata avvalorata da delle simulazioni di variazione delle lamelle.

Con un angolo di inclinazione delle lamelle pari a 0 il fabbisogno estivo risulta ben schermato qualunque sia la dimensione della superficie vetrata, rilevando scarti tra il 5%-9% tra Af=25% e Af=80%, mentre per la stagione invernale la medesima inclinazone risulta piuttosto ottimale nelle piccole superfici vetrate, è invece più efficace un'inclinazione maggiore (45° o superiore) in caso di ampie vetrate.

Si direbbe quindi che il sistema di oscuramento fisso porti maggiore efficacia in caso di facciate poco vetrate.

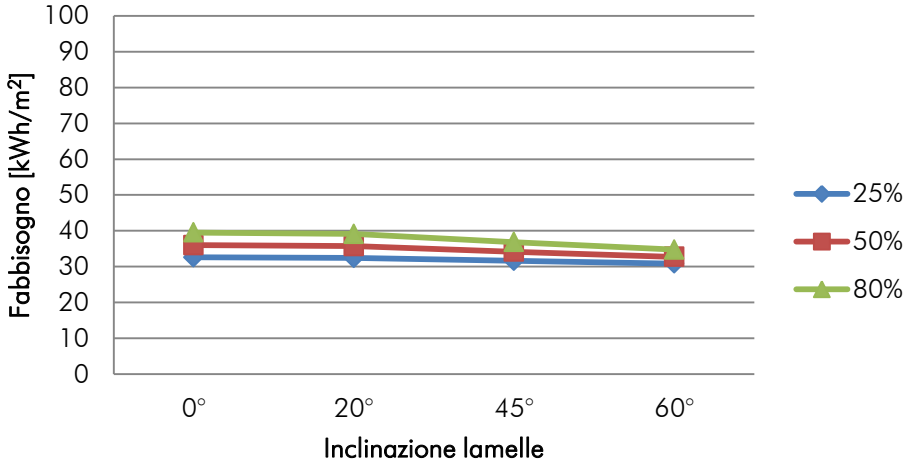


Tabella 7.1.3 – Fabbisogni invernali in funzione dell'inclinazione delle lamelle (larghezza lamelle d=5 cm)

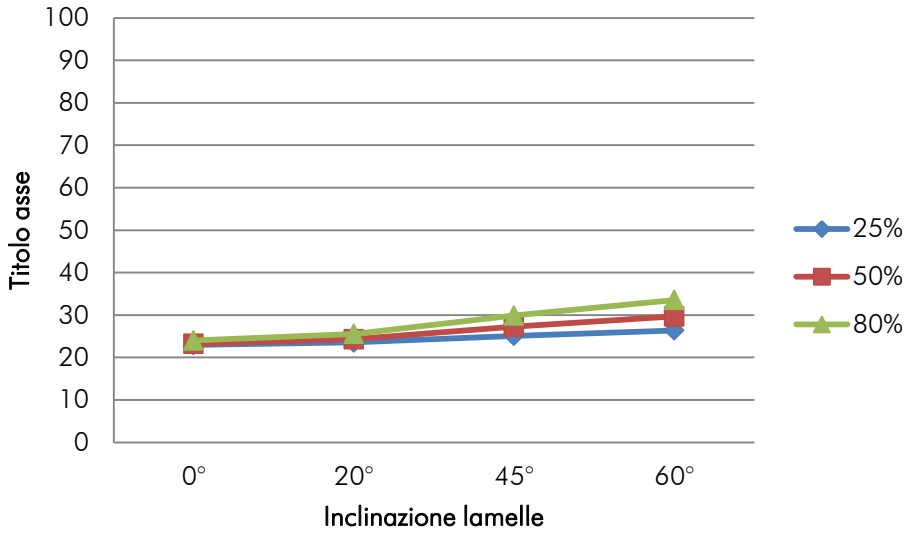


Tabella 7.1.4 - Fabbisogno estivo in funzione dell'inclinazione delle lamelle (larghezza lamelle d=5 cm)

Anche se i risultati paiono non discostarsi molto l'uno dall'altro a causa della piccola dimensione delle lamelle si può notare come l'andamento estivo invernale ed estivo delle superfici vetrate pari al 25% risultino meno influenzate dal variare dell'angolo di inclinazione delle lamelle.

La dipendenza dei fabbisogni aumenta sempre maggiormente all'aumentare delle superfici vetrate, raggiungendo già in questa casistica una differenza del 30% rispetto ad Af=25%.

7.1.2. ANALISI FABBISOGNI ESTIVI E INVERNALI

Le considerazioni appena esplicitate e i valori ottenuti dalle simulazioni hanno condotto alla scelta di un sistema a lamelle a bassa riflettanza come soluzione da ottimizzare in quanto rappresenta la casistica che riduce maggiormente i carichi termici estivi, divenuti la problematica principale da risolvere a seguito di una scelta caratterizzata da un sistema vetrato pari all'80%.

Tale condizione è stata quindi portata avanti nel processo di ottimizzazione delle lamelle.

Fabbisogno con Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K, g=0.6, LT=0.8

kWh	kWh/m^2
219667	41.82
117042	22.28

Tabella 7.1.5 - Fabbisogni con sistema a lamelle bassa riflettanza (Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K, g=0.3)

Utilizzando l'oscuramento a lamelle a basse rifletttanza si ottengono degli aumenti pari al 70% del fabbisogno invernale rispetto ad un'assenza di controllo solare.

7.1.3. ANALISI ILLUMINAMENTO E ABBAGLIAMENTO

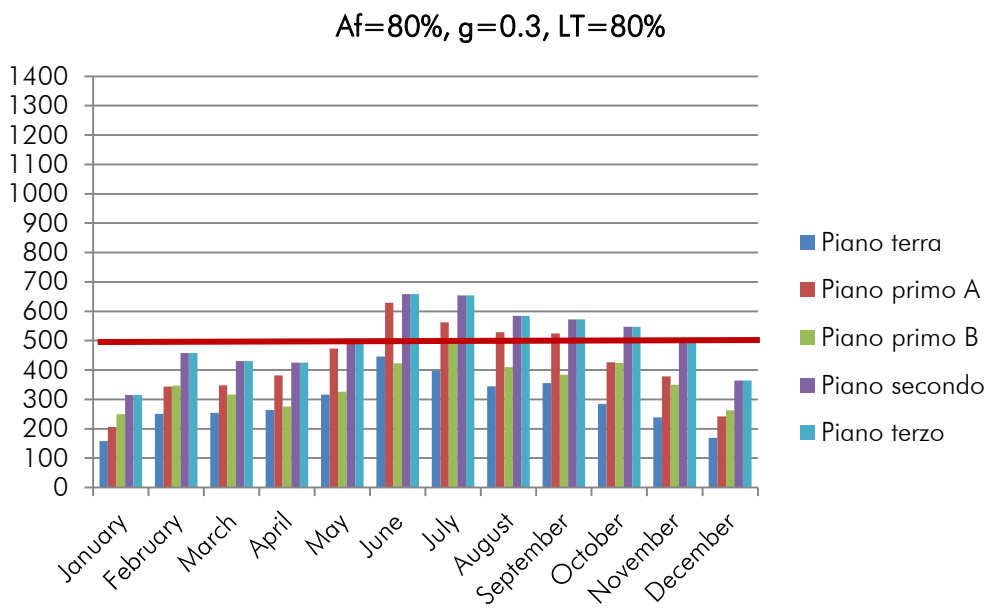


Grafico 7.1.1 - Illuminamento (lux) soluzione a lamelle

	Piano terra	Piano primo A	Piano primo B	Piano secondo	Piano terzo
Gennaio	10.31	9.30	11.17	9.21	9.21
Febbraio	11.74	10.85	11.97	10.75	10.75
Marzo	11.85	10.89	12.38	10.89	10.89
Aprile	12.94	12.14	12.74	12.22	12.22
Maggio	14.34	13.86	13.72	13.99	13.99
Giugno	15.86	16.03	14.53	16.18	16.18
Luglio	14.90	14.36	14.25	14.52	14.52
Agosto	13.82	13.12	13.39	13.22	13.22
Settembre	12.76	11.84	12.53	11.85	11.85
Ottobre	12.11	11.11	12.59	11.02	11.02
Novembre	11.44	10.57	11.46	10.42	10.42
Dicembre	10.69	9.56	10.88	9.45	9.45

Tabella 7.1.6 - Indici di abbagliamento con il sistema a lamelle

Gli indici di abbagliamento non superano mai il limite imposto, raggiungendo valori pari a 16 nel mese estivo di gugno. L'illuminamento naturale non è ottimizzato: alcuni piani non raggiungono il valore di progetto pari a 500 lux anche nei mesi estivi.

I valori rappresentati nel grafico nel periodo invernale suggeriscono una mancanza di illuminamento naturale, che andrà compensata con l'utilizzo di luce artificiale degli ambienti.

7.2. TENDE

Le possibilità delle tende esterne sono state indagate facendo variare i parametri di trasmittanza e riflettanza radiativa a cui il software associava di default le relative proprietà ottiche.

7.2.1. VARIAZIONE TRASMITTANZA E RIFLETTANZA ENERGETICA E VISIBILE

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando diverse combinazioni sia per quanto riguarda i parametri radiativi che per quelli ottici, valutandone i risvolti sul fabbisogno energetico e sulle prestazioni di illuminamento:

	ρ_E	α_E	τ_E	ρ_V	α_V	τ_V
1° caso	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.4
2° caso	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
3° caso	0.5	0.4	0.1	0.5	0.4	0.1

Tabella 7.2.1 - tipologie tende analizzate

7.2.2. ANALISI FABBISOGNI ESTIVI E INVERNALI

Fabbisogno con Uop=0.3 W/m^{2}K, Uw=0.9 W/m^{2}K, g=0.6, LT=0.8

Le definizioni di tende si riferiscono ai valori di trasmittanza e riflettanza radiativa;

- Shade (medium-medium) corrisponde quindi al caso 1° nel quale il valore di riflettanza è pari a 0.5 e la trasmittanza è di 0.4;
- Shade (high-low) corrisponde al caso 2° nel quale il valore di riflettanza è pari a 0.8 e la trasmittanza è di 0.1;
- Shade (medium-low) corrisponde al caso 3° in cui la riflettanza è di 0.5 e la trasmittanza riflettanza è di 0.1.

Le combinazioni simulate rispettano tutte il principio secondo cui la somma dei tre parametri debba essere pari a 1:

$$\tau+\rho+\alpha=1$$

Di seguito sono esposte i risultati dei fabbisogni estivi ed invernali ottenuti dalla simulazione tramite software:

Shade (medium-medium)		Shade (High - Low)		Shade (Medium - Low)	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
167747	31.93	220139	41.91	216567	41.23
198103	37.71	108920	20.73	112664	21.45

Tabella 7.2.2 - Fabbisogni con sistema di oscuramento tramite differenti tende

Si può notare come la combinazione dei parametri di trasmittanza e riflettanza delle tende incidano fortemente sul comportamento di fabbisogno che si desidera favorire. In particolare una media trasmittanza radiativa associata ad una media riflettanza (caso 1) incida sulla riduzione del contributo estivo in modo meno incisivo rispetto agli altri due casi (riduzione del 30% del fabbisogno estivo). I casi 2 e 3 riducono di una percentuale pari al 60% il fabbisogno estivo a discapito di un peggioramento delle condizioni invernali, nelle quali il sistema non dovrebbe utilizzare tale tipo di sistema di oscuramento.

7.2.3. ANALISI ILLUMINAMENTO E ABBAGLIAMENTO

I valori di illuminamento richiesti come obiettivo prestazionale sono stati considerati soddisfacenti solo con parametri ottici caratterizzata da un'elevata trasmittanza visibile.

I parametri ottici considerati sono risultati andare di pari passo ai rispettivi parametri radiativi, di conseguenza la soluzione di tenda più performante in termini di illuminamento è stata quella del caso 1° caratterizzato da una trasmittanza visibile più elevata rispetto agli altri due casi (τ_v=0.4).

Tuttavia anche in questa configurazione i 500 lux non vengono rispettati nei mesi di Gennaio e Dicembre ma sono ottenibili non utilizzando il sistema di oscuramento durante i mesi invernali.

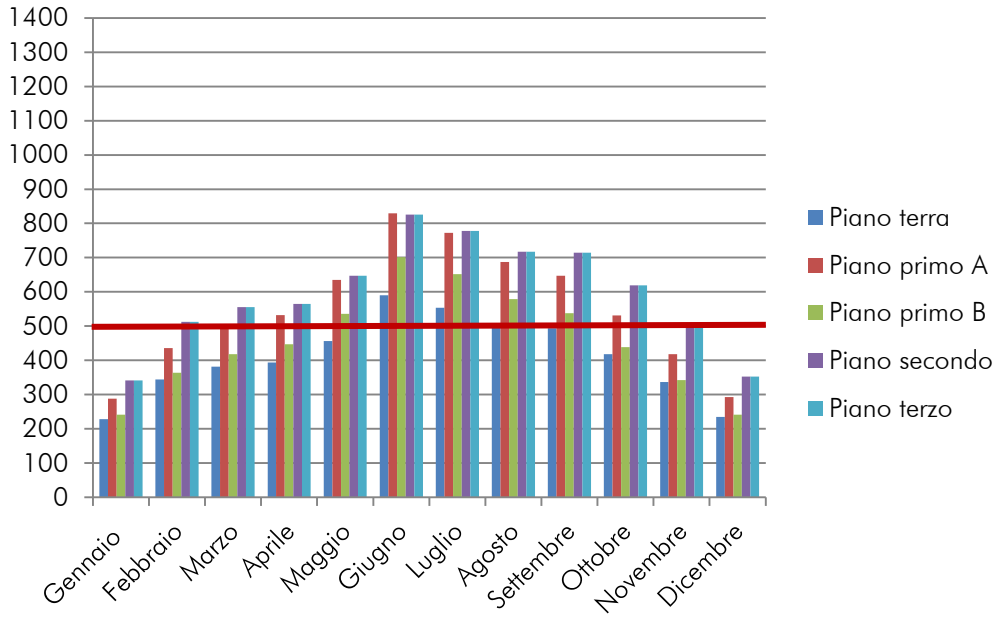


Grafico 7.2.1 - Illuminamento con sistema di oscuramento tramite tende esterne

Indice di abbagliamento

	Piano terra	Piano primo A	Piano primo B	Piano secondo	Piano terzo
Gennaio	7.1	5.9	8.5	6.0	6.0
Febbraio	8.4	7.1	9.9	7.2	7.2
Marzo	9.3	8.2	10.7	8.4	8.4
Aprile	10.3	9.5	11.4	9.7	9.7
Maggio	11.4	10.9	12.3	11.2	11.2
Giugno	12.4	12.0	13.2	12.4	12.4
Luglio	12.0	11.5	12.9	11.9	11.9
Agosto	11.1	10.3	12.2	10.6	10.6
Settembre	10.2	9.0	11.6	9.3	9.3
Ottobre	9.0	7.6	10.6	7.8	7.8
Novembre	7.9	6.5	9.5	6.6	6.6
Dicembre	7.0	5.7	8.4	5.8	5.8

Tabella 7.2.3 - Indici di abbagliamento con oscuramento tramite tende

Gli indici di abbagliamento sono rispettati e presentano valori inferiori rispetto alla casistica a lamelle.

Il risultato è infatti dovuto ad una conformazione della tenda che distribuisce la luce in modo più uniforme e diffusa rispetto ad una soluzione con sistema oscurante a lamelle.

7.3. RETI A MAGLIE METALLICHE

La tipologia di seguito analizzata è un sistema microforato ottenuto tramite maglie metalliche. Questa tipologia di oscuramento sfrutta la sua conformazione tridimensionale per ridurre l'ingresso solare diffondendo e reindirizzando la luce. Può fungere anche da elemento architettonico moderno e funzionale.[10]

7.3.1. ANALISI FABBISOGNI ESTIVI E INVERNALI

Ext Screen	
kWh	kWh/m^2
158086	30.09
224120	42.66

Tabella 7.3.1 - Fabbisogni con oscuramento tramite rete a maglia metallica

La tipologia di oscuramento tramite rete a maglie ha portato in prima battuta risultati non ritenuti competitivi rispetto alle altre due tipologie (lamelle e tende) in termini di riduzione del fabbisogno estivo, motivo per cui non sono stati effettuati ulteriori interventi di ottimizzazione.

Si rileva una riduzione del 25% del fabbisogno estivo rispetto all'assenza di un sistema di oscuramento. Tale risultato ha condotto a non proseguire il processo parametrico migliorativo per questo tipo di sistema.

I parametri su cui si potrebbe intervenire per un'evenutale ottimizzazione sono:

riflettanza radiativa e visibile della maglia, lo spazio di materiale tra un foro e il successivo, il diametro dei microfori e la distanza di posizionamento rispetto al vetro.

Non sono state svolte ulteriori indagini di illuminamento a causa dell'indesiderata prestazione termica rispetto agli altri due sistemi di oscuramento.

7.4. CONSIDERAZIONI E TERMINI DI CONFRONTO

Le analisi preliminari hanno permesso di avere una visione di massima delle potenzialità dei diversi sistemi.

Alcune simulazioni hanno portato a idonee caratteristiche di controllo del flusso termico ma con valori insufficienti di illuminamento.

[10] Mainini AG, Poli T, Zinzi M, Speroni A. Metal Mesh as Shading Devices and Thermal Response of an Office Building: Parametric Analysis. Energy Procedia 2015 November 2015;78:103-109.

Buone soluzioni di illuminamento sono state ottenute con schermature esterne a lamelle o tende riuscendo a garantire anche una riduzione pari a circa la metà del fabbisogno estivo rispetto al caso non avente alcun tipo di controllo solare.

Per poter scegliere la soluzione di oscuramento da sviluppare più a fondo tramite ulteriori ottimizzazioni sono state effettuate considerazioni pratiche.

Dalle analisi eseguite, sono state garantite le migliori prestazioni termiche e di illuminamento nelle casistiche che hanno previsto l'utilizzo della tenda.

Tale scelta però non è stata adottata anche per questioni contestuali e atmosferiche:

la prima motivazione è stata basata sulla conoscenza di base di una continua presenza di vento nella capitale azera, tale per cui il sistema, essendo composto da materiale di tipo tessile o sintetico potrebbe subire danni per scarsa resistenza a strappo da vento subendo inoltre le forti vibrazioni generate.

Un'ulteriore motivazione avvallata per la decisione di scartare la soluzione con tende esterne è stata la quasi totalità di possibilità di intravedere l'esterno quando il sistema è attivo, non permettendo quindi una libertà visiva degli utenti che lavorano all'interno del fabbricato. La soluzione a tende è risultata quindi meno dinamica nei confronti delle risposte funzionali che si desiderano garantire al progetto.

La soluzione di oscuramento tramite rete a maglia metallica non garantisce grande dinamicità di controllo solare essendo un sistema di tipo fisso. Inoltre tale sistema pare non essere ancora particolarmente sviluppato in Azerbaigian e non viene utilizzato né come sistema di oscuramento né come elemento architettonico caratterizzante di edifici ad uso uffici.

Il processo di ottimizzazione è stato concentrato quindi sulla tipologia di oscuramento a lamelle della quale si sono indagate le combinazioni diverse dei parametri da cui è composto.

8. IL PROGETTO DI SISTEMA A LAMELLE

L'analisi delle potenzialità delle lamelle è stata effettuata tramite analisi dei vari parametri coinvolti nel funzionamento di tale sistema.

In particolare si sono svolte simulazioni sulla profondità delle lamelle, sul passo, sullo spessore e sulla distanza dal vetro valutandone le interazioni tra di essi.

Il primo parametro analizzato è stato il passo delle lamelle, mantenendo fissi i parametri impostati di default dal programma Energyplus.

I parametri di involucro di partenza sono quelli esposti nel Cap. 7 (U_{op}=0.3 W/m^{2}K, U_w=0.9 W/m^{2}K, g=0.3, Af=80%).

I parametri del sistema di oscuramento mantenuti fissi al momento dei primi processi di simulazione sono stati i seguenti:

larghezza lamelle d=5 cm

distanza dal vetro a =5 cm

spessore lamella =1 cm

angolo di inclinazione= 0°.

La parametrizzazione è stata affrontata sempre mantenendo sotto controllo anche i valori di illuminamento; sono state effettuate diverse simulazioni di variazione di passo (definita come slat separation nel software).

Si riscontra come l'aumento progressivo del passo comporta, nel fabbisogno estivo, differenze di aumento rispettivamente pari al 102% nel caso pari a 10 e un ulteriore aumento pari al 158% nel caso di aggiunta di altri 5 cm (15 cm di passo).

La variazione è in linea con il presupposto che aumentando il passo tra le lamelle, l'efficacia del sistema stesso venga meno in quanto più diradato.

Si ottengono invece ottimi miglioramenti negli apporti solari in quanto l'ingresso solare è più favorito, si riscontrano infatti aumenti fino al 45% triplicando il passo di base considerato.

5 cm		10 cm		15 cm	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
207350	40.43	140600	26.76	115817	22.05
127345	24.24	257267	48.98	328367	62.51

Tabella 7.4.1- Variazioni fabbisogni in funzione del passo delle lamelle

Di pari passo segue il comportamento di illuminamento con l'ottenimento di valori sempre maggiori all'aumentare del passo. Successivamente verrà mostrato il comportamento dell'illuminamento in funzione del rapporto tra larghezza e passo delle lamelle.

Il solo controllo del passo del sistema a lamelle non permette quindi di ottimizzare al meglio le soluzioni, in quanto mantiene sbilanciati i valori di fabbisogno estivo ed invernale.

Verranno quindi analizzate le combinazioni e i risultati relativi ad un interazione tra passo e larghezza della lamella. Nel paragrafo 8.6 verrà meglio approfondita tale relazione rapportata al contributo di apporti solari che ne consegue.

Proseguendo nel processo si è quindi fatto variare il parametro inerente alla larghezza (identificata con il parametro d), in funzione delle configurazioni di passo analizzate.

In particolare lo svolgimento si è basato su una variazione dei valori pari a 5-7.5-10-20-30-50 cm.

Di tali analisi vengono di seguito esposte alcune casistiche utili al fine dell'interpretazione dei dati coinvolti.

Mantenuti fissi i valori precedenti si è analizzato il comportamento per diverse configurazioni dei due parametri scartando di volta in volta condizioni ritenute sfavorevoli in termini energetici.

5 cm		7.5 cm		10 cm	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
140600	26.76	185720	35.36	212350	40.43
257267	48.98	163231	31.08	127345	24.24

Tabella 7.4.2 - Variazione fabbisogni in funzione della larghezza delle lamelle (passo 10 cm)

5 cm		7.5 cm		10 cm	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
115817	22.05	140600	26.76	170128	32.39
328367	62.51	257267	48.98	192025	36.56

Tabella 7.4.3 - Variazione fabbisogni in funzione della larghezza delle lamelle (passo 15 cm)

7.5 cm		10 cm	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
121639	23.16	140600	26.76
310147	59.04	257267	48.98

Tabella 7.4.4 - Variazione fabbisogni in funzione della larghezza delle lamelle (passo 20)

Come si può dedurre dalle analisi parametriche portate avanti si sono gradualmente scartate le soluzioni con rapporti troppo bassi di d/p (si veda ad esempio il caso con d=7.5 cm e p=20 cm, rapporto d/p=0.375) in quanto non erano in grado di garantire la stessa riduzione del fabbisogno estivo paragonate a rapporti superiori.

Sono state inoltre effettuate analisi sul contributo dello spessore in alcune casistiche analizzate, rilevando un contributo pressoché ininfluente sul fabbisogno complessivo, si ottiene una differenza di circa lo 0.09% incrementando lo spessore di base di 1 cm a 3 cm nella casistica con d=5 cm e p=15 cm. Tale contributo non è stato pertanto ulteriormente indagato.

1 cm		2 cm		3 cm	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
115817	22.05	115764	22.04	115714	22.03
328367	62.51	328525	62.54	328670	62.57

Tabella 7.4.5 - Variazione fabbisogni in funzione dello spessore delle lamelle

Ulteriori analisi sono state effettuate facendo variare nuovamente l'inclinazione delle lamelle, scegliendo come casistica un sistema a lamelle low ref (ρ=0.2) con passo pari a p=15 cm,una larghezza d=5 cm e una distanza dal vetro a=5 cm. Le simulazioni sono state valutate rispettivamente per valori di g=0.6 e di g=0.3 del vetro.

20°		30°		45°		60°	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
125356	23.86	127600	24.29	129167	24.59	127853	24.34
296195	56.39	288609	54.94	284870	54.23	288061	54.84

Tabella 7.4.6 - Variazione fabbisogni in funzione dell'angolo delle lamelle (g=0.6)

20°		30°		45°		60°	
kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2	kWh	kWh/m^2
175411	33.39	177417	33.78	178747	34.03	127853	33.88
189942	36.16	185995	35.41	183820	34.99	288061	35.25

Tabella 7.4.7 - Variazione fabbisogni in funzione dell'angolo delle lamelle (g=0.3)

Il riscontro ottenuto è una minima percentuale di variazione (3%-4%) di entrambi i fabbisogni nelle due casistiche di g analizzate. Questa piccola variazione è attribuibile ad una scelta caratterizzata da un sistema di oscuramento distante dal vetro di 5 cm, che non garantisce la diminuzione di flusso termico entrante. L'inclinazione tuttavia, riesce a garantire il controllo di luce; sarà quindi necessario effettuare ulteriori ottimizzazioni inerenti alla distanza dal vetro del sistema schermante.

8.1. INTRODUZIONE

Le diverse analisi hanno portato a valutare diverse casistiche possibili, le quali per motivi energetici o di illuminamento non ottimale (ben al di sotto dei 500 lux imposti come condizioni di progetto) sono gradualmente state scremate a favore di configurazioni rientranti nei requisiti desiderati.

Di seguito vengono esposte le soluzioni che sono state portate avanti in quanto ritenute a basso impatto energetico estivo ed invernale e con caratteristiche di illuminamento migliorabili ma molto vicine alle condizioni di progetto.

La scelta di applicare lo stesso sistema di oscuramento in modo invariato in tutta la superficie edilizia è stata considerata poiché la conformazione morfologica, la compattezza del complesso edilizio e la sua conformità architettonica non hanno apportato differenze percentuali significative tali richiedere distinzioni di sistema oscurante.

Inoltre tale differenziazione avrebbe creato diverse condizioni visive percepite dagli utenti interni a seconda degli orientamenti dell'edificio.

8.2. LISTELLI

La soluzione ottenuta è caratterizzata da larghezza della lamella (d=5 cm) tale da essere paragonabile al suo spessore (sp=3 cm). Il risultato di tali dimensioni è di fatto non più una lamella, bensì un sistema a listelli di sezione rettangolare.

Tale sistema si adatta a garantire buone caratteristiche energetiche diventando anche parte integrante e elemento architettonico dell'involucro edilizio.

Fig. 8.1 - Esempio sistema Brise-soleil (http://www.solarbeamz.uk/)

Questo tipo di sistema è stato considerato fisso in quanto si è rilevato l'ininfluente contributo di una eventuale possibilità di regolazione dell'inclinazione considerando la sua posizione rispetto al vetro e la larghezza delle lamelle stesse.

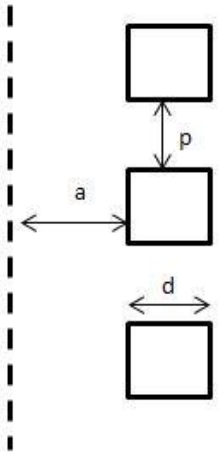


Fig. 8.2 - Rappresentazione simbolica listelli

Legenda:

a: distanza dal vetro

d: larghezza lamella

p: passo tra le lamelle

a (cm)	d (cm)	p (cm)	d/p	ρ_E
5	5	15	0.33	0.2

Tabella 8.2.1 - parametri listelli

8.3. LAMELLE ORIZZONTALI

La soluzione a lamelle orizzontali è caratterizzata da una maggiore distanza dal vetro, pari a 60 cm.
La dimensione della lamella permette in questo caso una regolazione dell'ingresso di luce solare e un eventuale adeguamento dell'inclinazione in base alle esigenze stagionali dell'edificio.

Il sistema è quindi di tipo dinamico e fornisce valori di illuminamento non sempre garanti dei 500 lux richiesti, soprattutto in fase invernale in cui si raggiungono valori massimi attorno ai 300 lux.
Tali risultati comporterebbero consumi elettrici adibiti all'illuminazione artificiale dei mesi invernali.

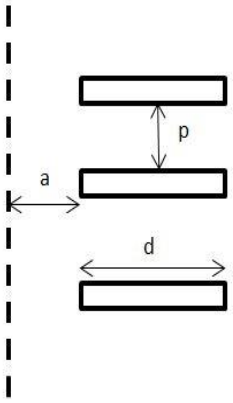


Fig. 8.3 - Rapprresentazione simbolica lamelle orizzontali

Legenda:

a: distanza dal vetro

d: larghezza lamella

p: passo tra le lamelle

a (cm)	d (cm)	p (cm)	d/p	ρ_E
60	20	50	0.40	0.2

Tabella 8.3.1 - parametri lamelle orizzontali

8.4. LAMELLE VERTICALI

La soluzione con oscuramento verticale è stata analizzata seguendo gli stessi procedimenti parametrici effettuati per le casistiche di oscuramento orizzontale.

Sono infatti state effettuate variazioni in termini di passo, larghezza della lamella, distanza dal vetro, spessore della lamella ed è stata infine scelta una combinazione che garantisse buone prestazioni energetiche.

Fig. 8.4 - Esempio di sistema di oscuramento a lamelle verticali (http://www.archiexpo.com/)

L'ottimizzazione ha permesso di raggiungere comportamenti di tipo energetico paragonabili alle soluzioni precedenti a discapito però di un illuminamento molto basso.

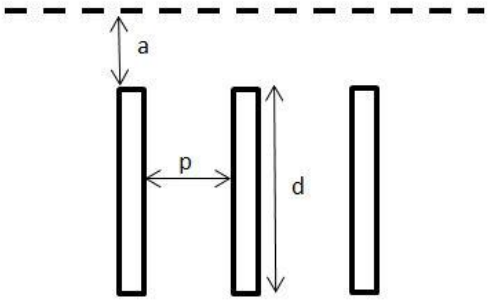


Fig. 8.5 - Raprresentazione simbolica lamelle verticali

Legenda:

a: distanza dal vetro

d: larghezza lamella

p: passo tra le lamelle

a (cm)	d (cm)	p (cm)	d/p	ρ_E
30	30	50	0.60	0.2

Tabella 8.4.1 – parametri lamelle verticali

8.5. CONFRONTO SOLUZIONI

8.5.1. CONFRONTO FABBISOGNI ESTIVI ED INVERNALI

Le tre soluzioni sono state messe a confronto per valutare vantaggi e svantaggi di ciascuna casistica.

Di seguito sono esposte le condizioni di involucro per poi effettivamente scandagliare le soluzioni oscuranti ad esso applicate, sia dal punto di vista del fabbisogno energetico che di valore di illuminamento dei vari piani:

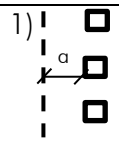
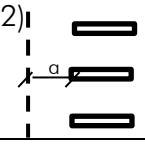
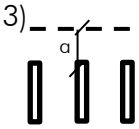
- Componente opaca

$$U_{op} = 0.3\ W/m^2K$$

- Componente vetrata

U_w [W/m^{2}K]	g	τ_V
0.9	0.3	0.7

- Sistema di oscuramento

	Morfologia			Proprietà radiative			Proprietà ottiche		
	% V/p	dist. vetro a (cm)	Orientamento	τ_E	ρ_E	α_E	τ_V	ρ_V	α_V
1) 	82%	5	Orizzontale	0	0.2	0.8	-	-	-
2) 	90%	60	Orizzontale	0	0.2	0.8	-	-	-
3) 	90%	30	Verticale	0.5	0.2	0.3	-	-	-

Fabbisogno:

1)

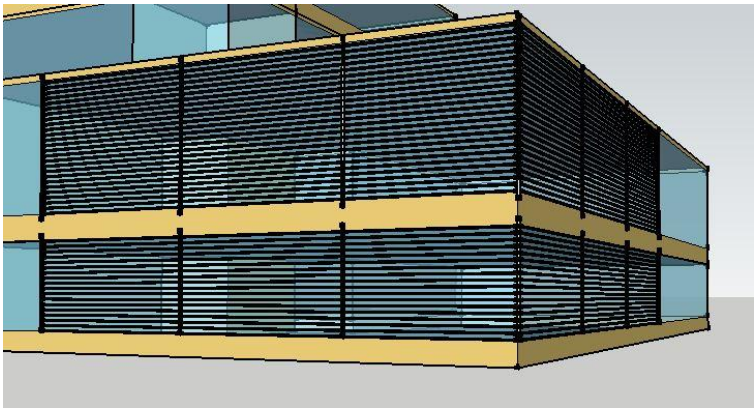


Fig. 8.6 - Stralcio sistema di oscuramento a listelli

kWh	kWh/m^2
178747	34.03
183820	34.99

Tabella 8.5.1 - Fabbisogni sistema a listelli

2)

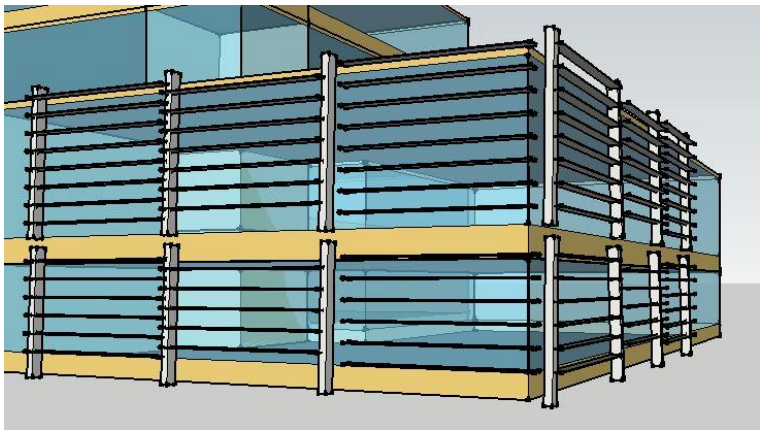


Fig. 8.7 - Stralcio sistema di oscuramento a lamelle orizzontali

kWh	kWh/m^2
176570	33.61
189683	36.11

Tabella 8.5.2 - Fabbisogni sistema a lamelle orizzontali

3)

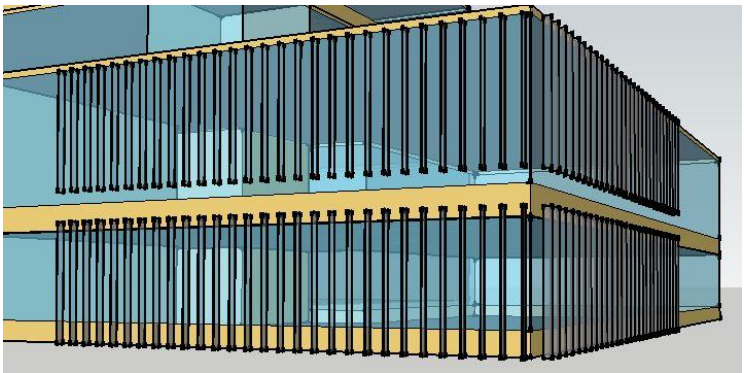


Fig. 8.8 - Stralcio sistema di oscuramento a lamelle verticali

kWh	kWh/m^2
162061	30.85
218750	41.64

Tabella 8.5.3 - Fabbisogni sistema a lamelle verticali

Effettuando un confronto dei fabbisogni termici estivi ed invernali si riscontrano risultati prestazionalmente efficienti.

La configurazione con sistema di oscuramento a listelli presenta un miglioramento del fabbisogno estivo pari al 38% rispetto alla configurazione senza schermature. Il fabbisogno invernale sale anch'esso del 38%, risultato riducibile se si considera la possibilità di regolare l'inclinazione dei listelli.

La configurazione rappresentata da un sistema a lamelle verticali risulta, se paragonata alle altre due opzioni, la peggiore in termini di riduzione degli apporti estivi, raggiungendo un fabbisogno pari a quasi 42 kWh/m^2. Vi è comunque un miglioramento favorevole pari al 27%.

Il sistema con configurazione a lamelle orizzontale presenta miglioramenti aggiuntivi (pari al 13%) rispetto alla configurazione a lamelle verticali a discapito di un leggero peggioramento delle condizioni invernali, che sono tuttavia regolabili tramite opportuna inclinazione delle lamelle.

8.5.2. CONFRONTO VALORI DI ILLUMINAMENTO

Di seguito sono esposti i risultati ottenuti dalle diverse configurazioni di sistema di oscuramento analizzate:

1)

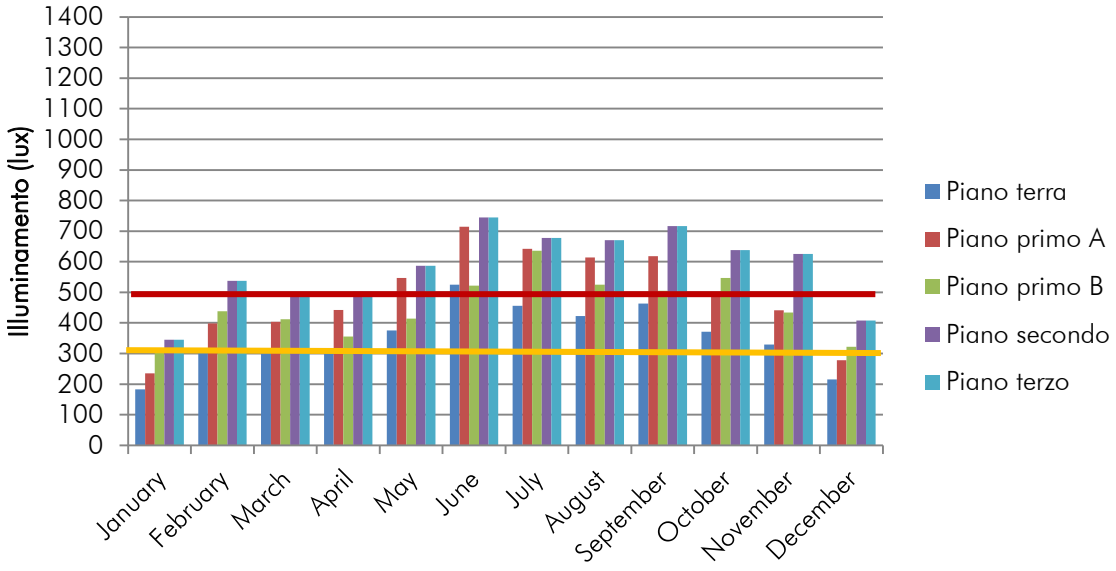


Grafico 8.5.1 - Valori di illuminamento sistema a listelli

2)

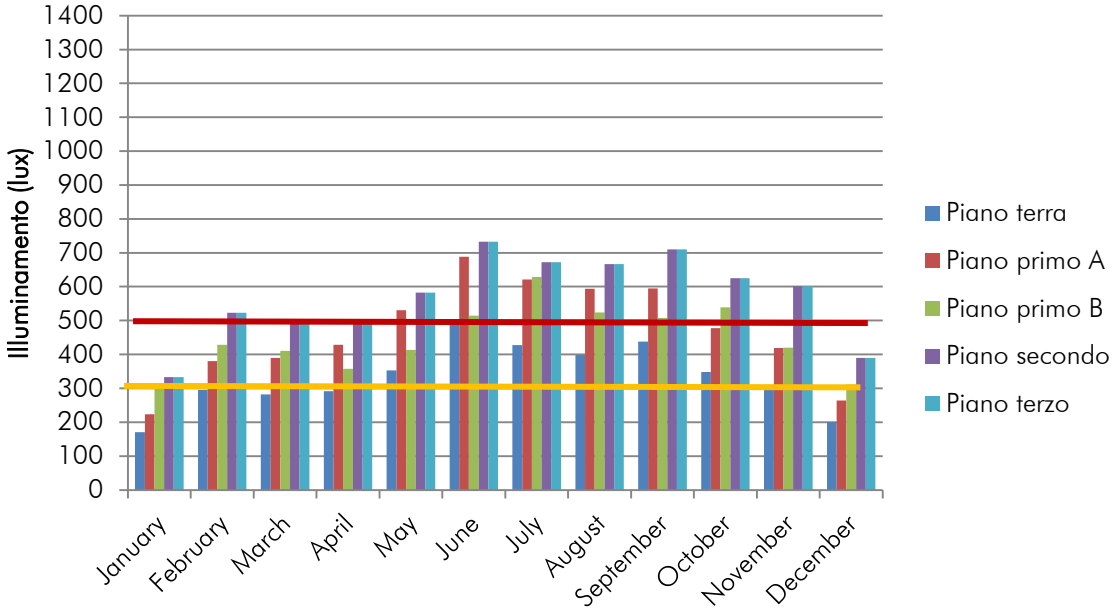


Grafico 8.5.2 - Valori di illuminamento sistema a lamelle

3)

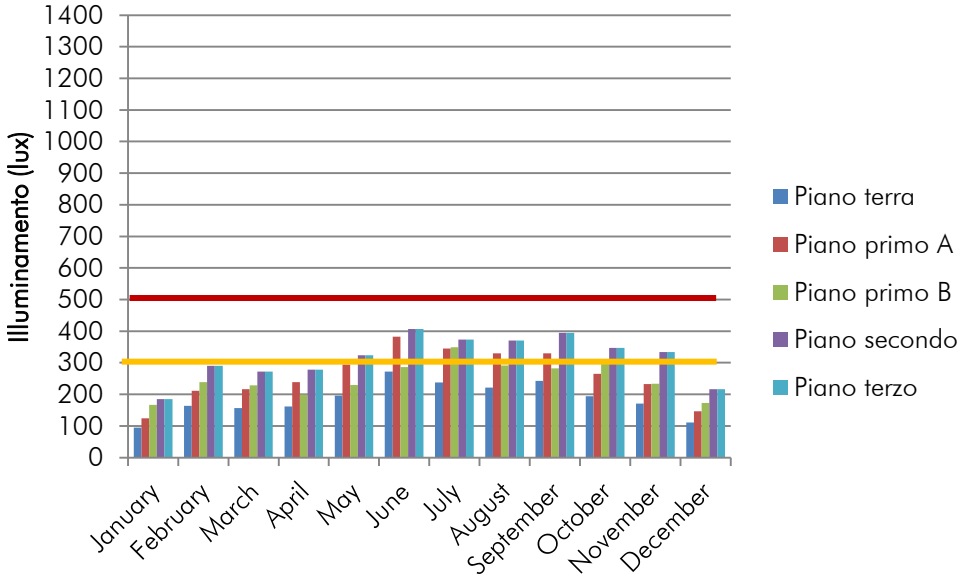


Grafico 8.5.3 - Valori di illuminamento sistema a lamelle verticali

Legenda:

- Soglia 500 lux sul piano di lavoro
- Soglia 300 lux sul piano di lavoro

I grafici di illuminamento appena presentati mostrano come la prestazione dei 500 lux di progetto non sia mai pienamente rispettata in nessuno dei 3 casi analizzati.
Si rileva inoltre come la situazione a lamelle verticali abbia i risultati meno efficienti in termini di comfort luminoso.
Sono state definite pertante due soglie di illuminamento pari a 300 lux e 500 lux all'interno della quale bisognerà adottare soluzioni di tipo artificiale per raggiungere valori adeguati ad un lavoro da ufficio.
Questa criticità porterebbe aggravi dei consumi elettrici adibiti all'illuminazione, che si andranno a sommare ai già presenti carichi interni dovuti agli apparecchi elettrici.
Diventa importante avere sotto controllo questo aspetto per avere riscontri positivi anche economicamente durante il ciclo di vita dell'edificio.

8.6. VARIAZIONE TRASMISSIONE LUMINOSA

Il processo di ottimizzazione è stato quindi implementato intervenendo sui parametri ottici del sistema di oscuramento.
In particolare si è verificato il comportamento dei valori di illuminamento al variare del parametro di trasmittanza visibile del sistema oscurante.

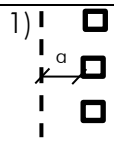
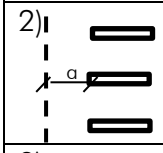
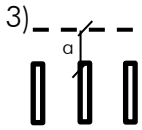
	Morfologia			Proprietà radiative			Proprietà ottiche		
	% V/p	dist. vetro a (cm)	Orientamento	τ_E	ρ_E	α_E	τ_V	ρ_V	α_V
1) 	82%	5	Orizzontale	0	0.2	0.8	0.5	0.2	0.3
2) 	90%	60	Orizzontale	0	0.2	0.8	0.5	0.2	0.3
3) 	90%	30	Verticale	0.5	0.2	0.3	0.5	0.2	0.3

Tabella 8.6.1- Parametri radiativi e ottici dei sistemi di oscuramento analizzati

Fig. 8.9 - Esempio di sistema di oscuramento a lamelle verticali trasparenti – Novartis Pharmaceutical Corporation, Building 337 (http://vinoly.com/)

La soluzioni nella quale il sistema di oscuramento non è completamente opaco ma traslucido permette di ottenere maggiore illuminamento degli ambienti. Questa caratteristica garantisce il vantaggio di avere una buona combinazione di discreto fabbisogno energetico e di efficienza per quanto riguarda l'illuminamento; tale risultato ha portato ad effettuare ulteriori analisi di ottimizzazione delle configurazioni opache al fine di verificarne il miglioramento dell'illuminamento.

Per risolvere la criticità di scarso illuminamento si è optato per dei sistemi di oscuramento che mirano al maggior ingresso di luce pur mantenendo la caratteristica schermante delle radiazioni termiche, a questo proposito sono stati utilizzati sistemi che grazie ad un grado maggiore di traslucidità permettono l'ingresso di una percentuale di luce solare. Nello specifico come dati input è stata assegnata una percentuale di trasmissione luminosa pari al 50%.

In questo modo i valori di illuminamento sono aumentati notevolmente pur mantenendo inalterato il fabbisogno.

Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti prima e dopo l'intervento sul sistema di oscuramento:

1a) Listelli opachi

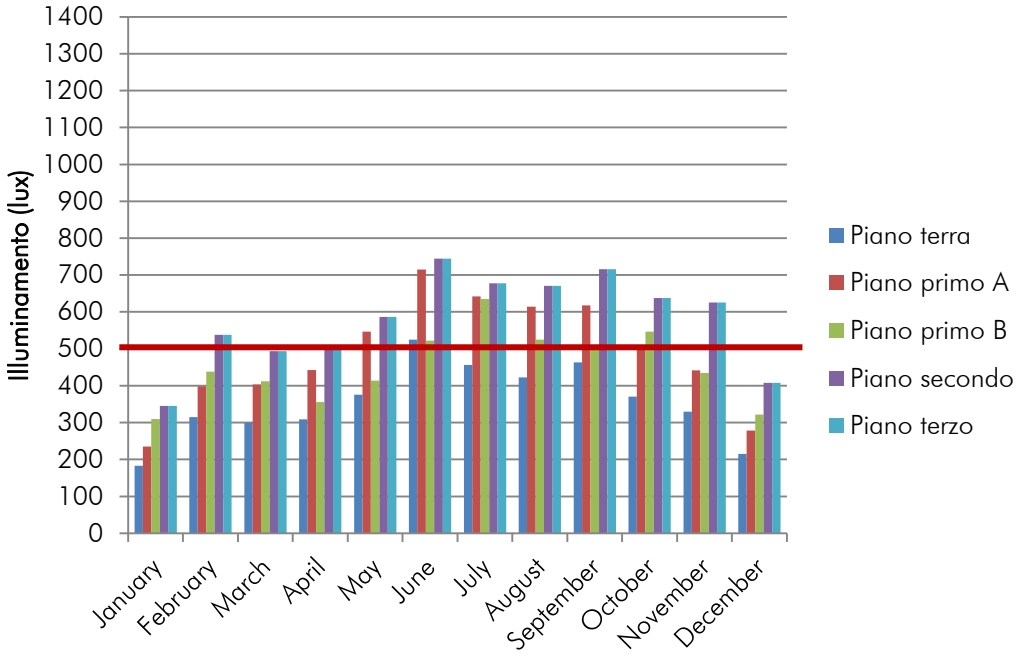


Grafico 8.6.1 - Illuminamento con sistema di oscuramento a listelli opachi

1b) Listelli traslucidi

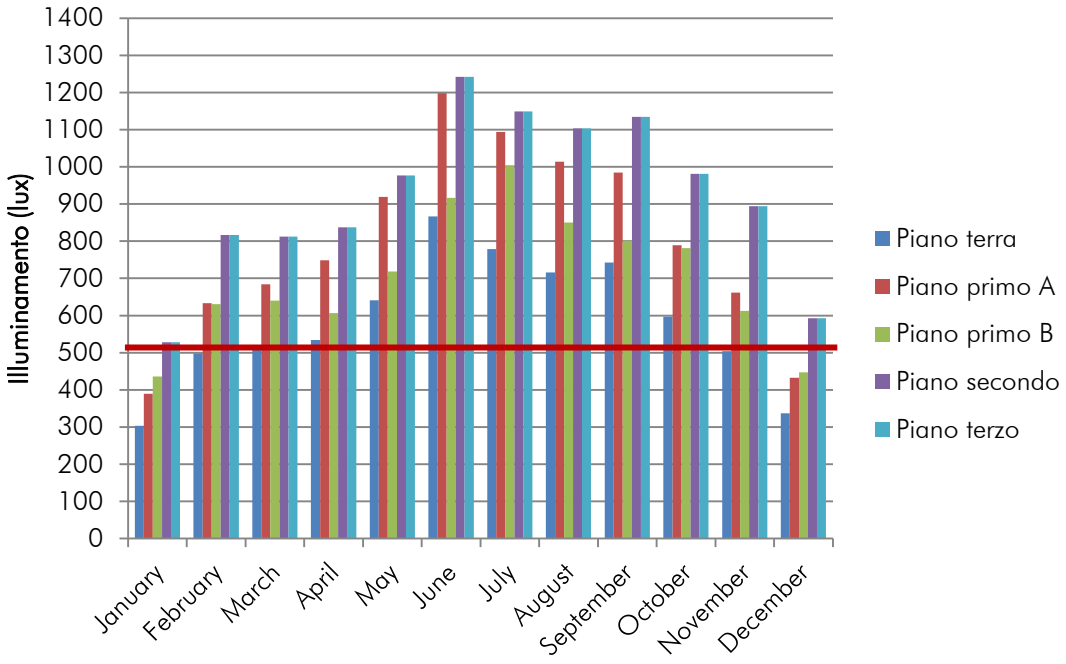


Grafico 8.6.2 - Illuminamento con sistema di oscuramento a listelli traslucidi

2a) Lamelle orizzontali opache

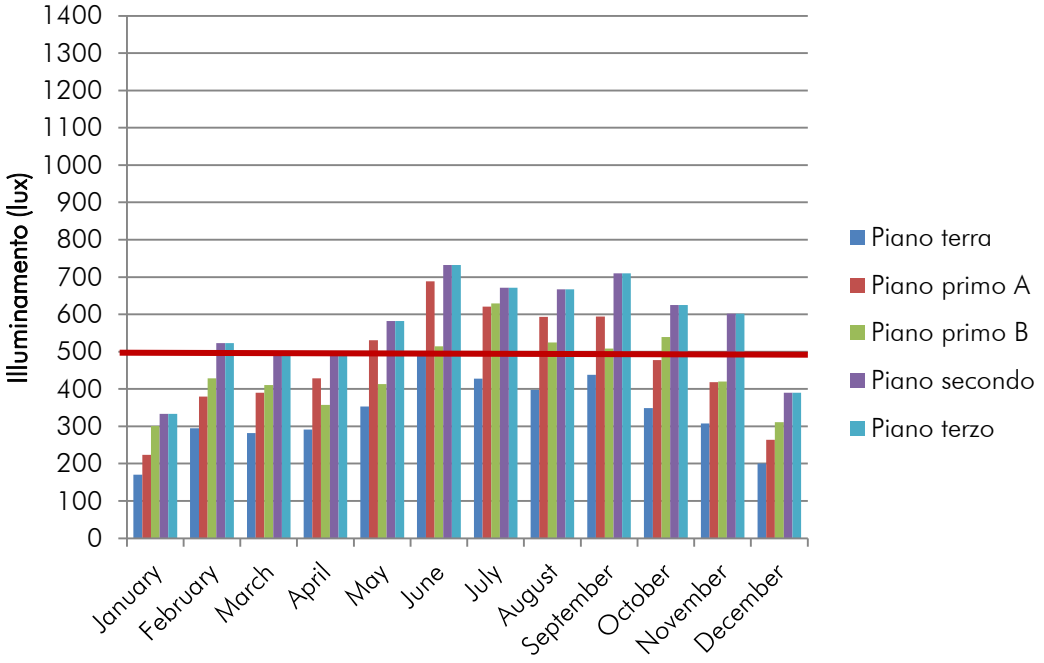


Grafico 8.6.3 - illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle orizzontali opache

2b) Lamelle orizzontali traslucide

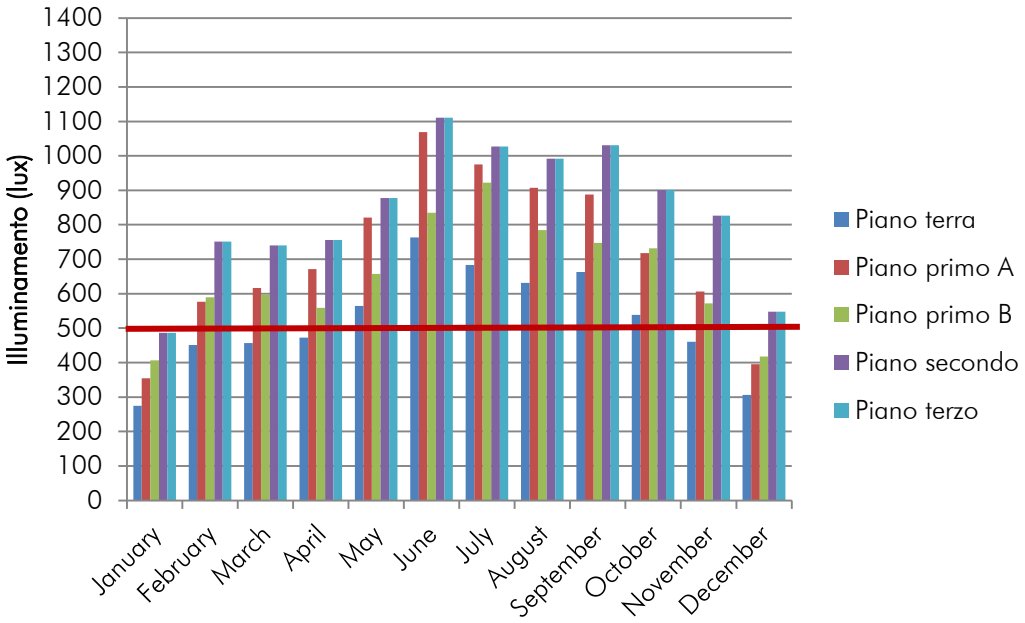


Grafico 8.6.4 - Illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle orizzontali traslucide

3a) Lamelle verticali opache

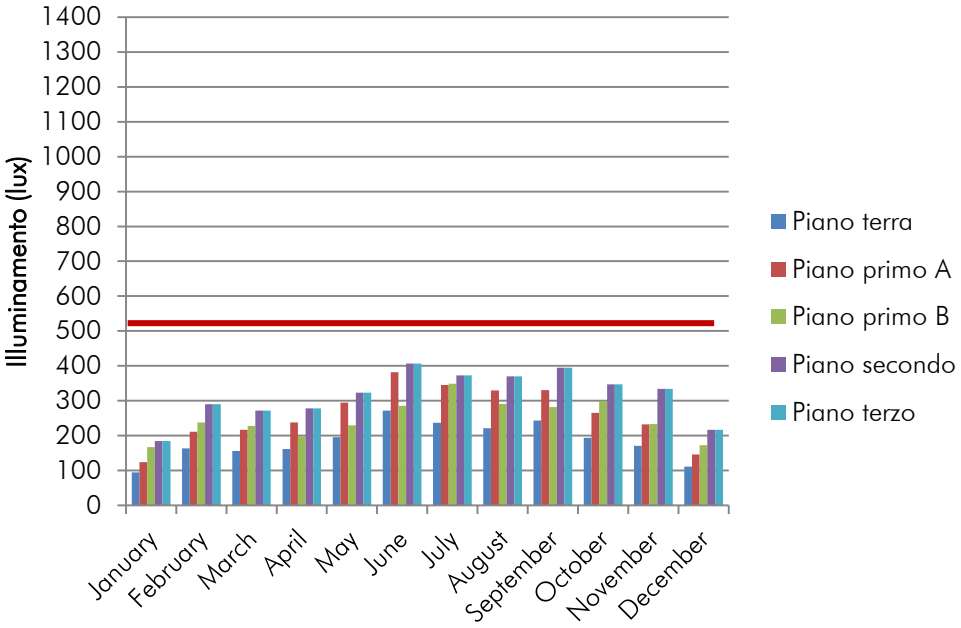


Grafico 8.6.5 - Illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle verticali opache

3b) Lamelle verticali traslucide

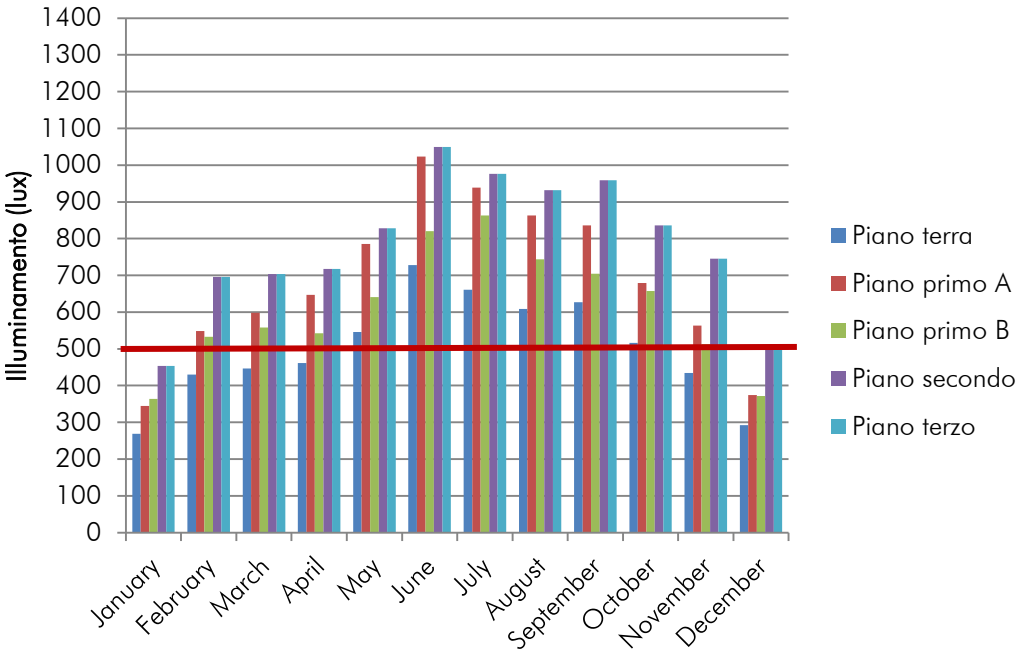


Grafico 8.6.6 - Illuminamento con sistema di oscuramento a lamelle verticali traslucide

I grafici mostrano dei valori di illuminamento prestazionalmente al di sopra delle condizioni di progetto assegnate come obiettivo, fatta eccezione dei mesi di Gennaio e Dicembre in cui i valori non si riescono a raggiungere completamente nei vari piani del complesso edilizio. Tuttavia vi è un riscontro migiorativo mensile complessivo tale da ritenere le soluzioni analizzate prestazionalmente valide.

Oltre agli aspetti energetici e di comfort luminoso, è importante fare valutazioni pratiche che il programma di simulazione non è in grado di effettuare:

Fenomeni di invecchiamento, di depositi di sporcizia nel tempo, cicli di manutenzione diventano caratteristiche che incidono nel tempo nel mantenimento delle prestazioni che si sono analizzate con le simulazioni.

Il sistema di oscuramento, pur essendo traslucido, non dovrebbe essere di un colore troppo trasparente e chiaro che renderebbe il sistema troppo esposto alla sporcizia che vi si deposita. Una trasparenza elevata comporta quindi maggiori attenzioni manutentive allo scopo di mantenere le prestazioni visive inalterate nel tempo Con l'utilizzo di un colore più opacizzato è possibile ridurre parzialmente il discomfort visivo causato dalla presenza dell'eventuale sporcizia depositata, garantendo in ogni caso una buona visuale dell'ambiente esterno.

La scelta di utilizzare un sistema involucro + dispositivo di oscuramento traslucido si adatta molto bene anche al nuovo contesto urbano che si sta delineando grazie al nuovo progetto del masterplan di White City di Baku, un grande progetto di riqualificazione su scala urbana che rivedrà l'assetto edilizio della capitale dell'Azerbaijan in modo profondo e moderno.

Fig. 8.10 - White City, Central Business District, studio Atkins (http://www.atkinsglobal.com/)

8.7. ANALISI APPORTI SOLARI IN BASE A RAPPORTO LARGHEZZA LAMELLA E PASSO (% d/p)

Le soluzioni portate avanti nel corso delle analisi presentano diverse caratteristiche tra cui il passo differente tra gli elementi del sistema oscurante e la larghezza in profondità dei singoli elementi. Svolgendo delle ulteriori analisi, si è tentato di rilevare una regola che legasse gli apporti solari Q_s proprio a tale rapporto.

Si è potuto rilevare come la curva rappresentata dal legame tra questi valori rappresenti all'incirca un andamento di tipo iperbolico.

La soluzione a listelli, aventi larghezza di partenza molto piccola, è stata fatta variare sia per passo che per larghezza, in quanto non era possibile avere un numero adeguato di prove facendo variare la sola larghezza. Questo è dovuto al fatto che la soluzione presentata ha il sistema di oscuramento molto vicino al filo facciata vetrata (15 cm di distanza del vetro) che non permettevano un'eccessiva variazione di larghezza della lamella. Di seguito sono riportati i risultati delle soluzioni simulate:

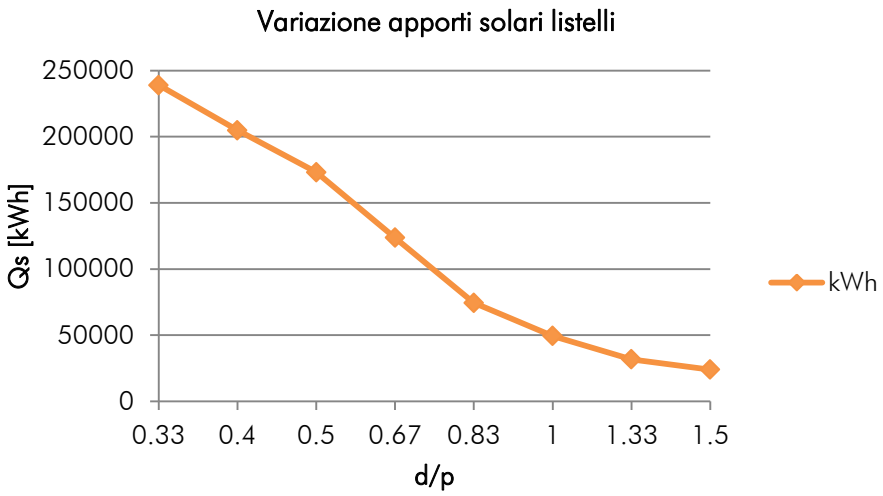


Grafico 8.7.1 - Variazione apporti solari configurazione a listelli orizzontali

Come si può notare si riscontra un calo degli apporti solari all'aumentare del rapporto d/p, raggiungendo una riduzione del 50% al raddoppiare del rapporto iniziale fino a raggiungere una perdita del 90% con un rapporto paro a 5 volte quello iniziale.

In contemporanea inoltre, si rilevano conseguenti peggioramenti in termini di illuminamento e perdita di efficienza di fabbisogno termico.

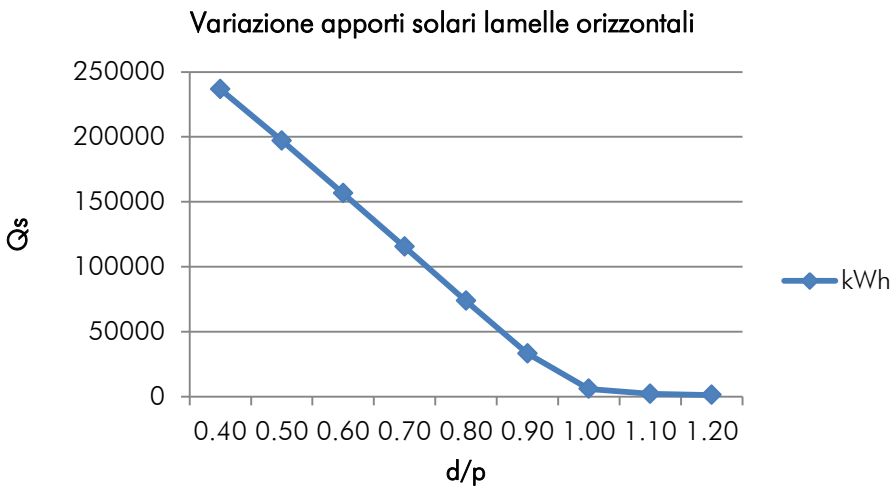


Grafico 8.7.2 - Variazione apporti solari configurazione a lamelle

Nel caso delle lamelle orizzontali invece, si può notare un calo quasi lineare per poi avere un punto di flesso in corrispondenza di d/p compreso tra 0.9 e 1, in corrispondenza del quale si riscontrano cali negli apporti solari di 86%-97% per poi continuare a tendere verso l'azzeramento degli apporti solari. In questo caso è stato fatto variare solo il parametro d in quanto lo spazio disponibile per ampliare la

larghezza delle lamelle era decisamente maggiore rispetto alla soluzione precedente; ciò ha comportato infatti un grafico più uniforme.

La differenza dei valori delle soluzioni a parità di rapporto d/p fanno presuppore l'entrata in gioco di un'altra variabile importante all'interno del calcolo degli apporti solari all'interno del software Energy Plus.

A parità di tale rapporto la variabile che incide sul quantitativo di apporti solari che raggiunge la facciata è dovuto anche al contributo della distanza dal vetro del sistema di oscuramento.

La prima soluzione infatti, ad alti valori del rapporto, presenta ancora del contributo di apporto solare (seppur piccolo, 24000 kWh in corrispondenza di un rapporto pari a 1.5), a differenza dell'altra soluzione nella quale, essendo il sistema di oscuramento già ben distanziato dal vetro, non permette di far arrivare alcun tipo di radiazione alla facciata all'aumentare eccessivo di tale rapporto.

8.8. CONSIDERAZIONI SULLA PERCEZIONE VISIVA DEI SISTEMI DI OSCURAMENTO

Di seguito vengono esposte le relative superfici pavimentate e finestrate di ciascun piano:

	piano terra	piano primo A	piano primo B	piano secondo	piano terzo
Area pavimentata [m^2]	1366.25	676.33	689.92	676.33	676.33
Area finestrata [m^2]	655.658	371.14	421.3825	478.7475	478.7475
A_{pav}/A_{fin}	48%	55%	61%	71%	71%

Come si può notare le tre soluzioni con sistema traslucido permettono un aumento di illuminamento che permette quasi sempre la soglia di 500 lux sul piano di lavoro sfruttando la sola illuminazione naturale.

Per la scelta della soluzione più adeguata si opterà quindi basandosi anche su altri parametri di valutazione come ad esempio la percezione visiva dell'esterno da parte degli utenti lavoratori all'interno dell'edificio e ragionamenti mirati al corretto orientamento delle lamelle oltre che a ragionamenti su questioni di pulizia e manutenzione.

Fig. 8.11 - Visuale interna con sistema di oscuramento a listelli

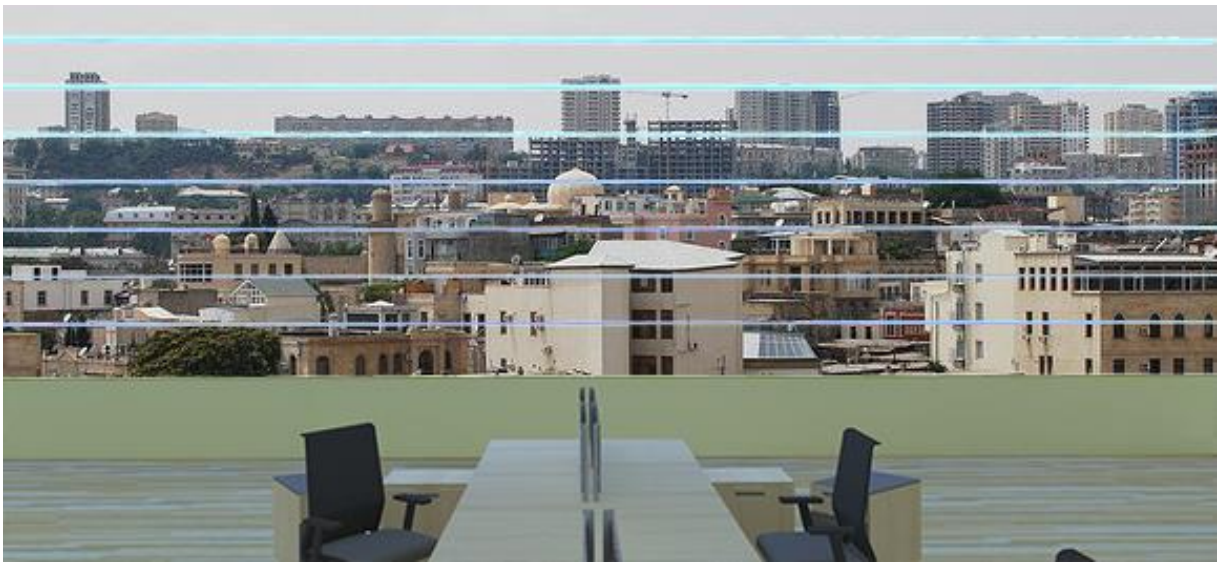


Fig. 8.12 - Visuale esterna con sistema di oscuramento a lamelle orizzontali traslucide

Fig. 8.13 - Visuale esterna con sistema di oscuramento a lamelle verticali traslucide

Le configurazioni di oscuramento sono state rappresentate modellando geometricamente un piano tipo del nuovo complesso edilizio.

In particolare si è rappresentata una visuale frontale della superficie vetrata da parte di un utente interno, simulando quindi la percezione visiva che riceve da ciascuna tipologia di oscuramento.

La visuale diretta dell'ambiente esterno è garantita dalle configurazioni in modo differente.

La configurazione a listelli è più fitta e interrompe la visuale in modo più evidente.

La configurazione a lamelle orizzontali permette una buona visuale esterna e il passo tra la lamelle ne riduce la sensazione di disturbo visivo.

La configurazione a lamelle verticali garantisce anch'essa una buona visibilità verso l'esterno; si riscontra tuttavia una maggiore difficoltà di visuale laterale dovuta alla presenza delle lamelle stesse che impediscono la facilità di visione periferica.

La casistica finale è stata infine valutata anche ai fini pratici:

- Pulizia

La vicinanza del vetro svolge un ruolo importante nella facilità di pulizia dell'intero sistema oscurante.

Il sistema a listelli, configurato ad una distanza di 5 cm dal vetro, rende difficoltosa l'attività di pulizia della superficie esterna della superficie vetrata. Inoltre l'eventuale accumulo di polveri e materiali inquinanti che si depositano sui listelli, presentano probabilità più elevate che si depositino anche sulla superficie trasparente.

Il passo di 15 cm tra i listelli contribuisce alla difficoltà di effettuare interventi di pulizia accurati.

La configurazione a lamelle sia orizzontali che verticali è stata disposta ad una distanza di 50 cm dalla superficie vetrata. Il deposito di sporcizia sulla superficie vetrata risulta più difficoltoso e le attività di pulizia ordinaria sono facilitate da un più ampio spazio di manovra.

- Manutenzione

La manutenzione del sistema di oscuramento adottato svolge un ruolo importante nella durabilità e nell'efficienza nel tempo delle prestazioni dell'edificio, ma anche nella riduzione dei costi.

Un sistema che richiede meno interventi di manutenzione sia ordinaria che straordinaria può portare benefici evidenti in termini economici.[11]

La manutenzione della configurazione a listelli necessita di interventi più delicati e più frequenti a causa dei numerosi elementi presenti. Gli interventi potrebbero essere meno frequenti in caso di elementi meccanicamente più stabili e numericamente inferiori.

- Integrabilità di sistemi ad energia rinnovabile

La possibilità di integrare il sistema di oscuramento con impianti fotovoltaici favorisce lo sfruttamento di fonti rinnovabili per il consumo elettrico dell'edificio.

Un corretto posizionamento dell'impianto assume grande importanza per garantire la maggiore efficienza di funzionamento.

La configurazione a listelli non presenta grandi margini di integrabilità a causa della piccola superficie degli elementi da cui è composto.

L'integrabilità è invece favorita nelle lamelle di più grande dimensione nelle quali la regolazione dell'inclinazione assume un ruolo di primaria importanza. La configurazione orizzontale si presta a migliori condizioni di inclinazione e di regolazione a fronte della ricezione della radiazione solare.

9. CONCLUSIONI

9.1. SOLUZIONI GENERALI SUI SISTEMI DI CONTROLLO

I sistemi di controllo solare sono molteplici e possono distinguersi per forma, dimensione, posizionamento, orientamento, materiale e differenti altri parametri fisici.

Tali sistemi possono essere componenti aggiuntivi dell'edificio (creando un sistema integrato) o possono esserne parte integrante ottenibile in base alla propria conformazione morfologica (si vedano rientranze, sporgenze o aggetti).

La morfologia seppur funzionale per certe casistiche risulta un modello di tipo statico, non in grado pertanto di agire in modo dinamico in risposta alle esigenze contestuali e variabili del clima.

Tale problematica è tuttavia risolvibile adottando specifici accorgimenti sulla parte vetrata:

- Applicazione di film protettivi

[11] Invidiata A, Ghisi E. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. J Clean Prod 2016 10/1;133:1371-1383.

- Vetri elettrocromici ed adattivi
- Vetri gasocromici
- Vetri elettroforetici[12]
- Regolazione di valori di trasmittanza solare g e della trasmittanza visibile.

In generale, l'utilizzo di sistemi oscuranti aggiuntivi e integranti il sitema vetrato risulta l'opzione più diffusa per garantire maggiore flessibilità e controllo.

Le principali funzioni garantite dal sistema serramento-sistema di oscuramento sono:

- Controllo dei flussi d'aria per quanto riguarda aspetti di ventilazione;
- Regolazione del flusso termico;
- Regolazione del flusso luminoso;
- Controllo del livello di privacy;

oltre a diverse prestazioni di tipo meccanico e acustico specificate dalle normative di ciascun paese.

Per quanto riguarda il controllo delle condizioni termiche e solari è bene distinguere il corretto posizionamento del sistema di oscuramento rispetto al sistema vetrato.

Esso può porsi esternamente, internamente o anche interposto al serramento stesso, in caso di presenza di intercapedine idonea al suo collocamento.

Il posizionamento interno del sistema è in generale utilizzato per un utilizzo di tipo schermante della luce in ingresso nell'ambiente interno ma non fornisce buone prestazioni in termini di riduzioni di fabbisogno in quanto non riducono l'ingresso energetico degli apporti solari che attraversano il vetro.

Una condizione intermedia riesce a mitigare parzialmente l'apporto solare entrante ma una eventuale manutenzione del sistema risulterebbe difficoltosa.

Per un utilizzo ottimale del sistema di oscuramento come elemento di controllo energetico, il posizionamento esterno rispetto alla componente vetrata risulta spesso essere la soluzione da adottare, in quanto diventerebbe il primo elemento che scherma e riduce la percentuale di energia solare. Il risultato di tale posizionamento è un inferiore quantità di energia radiativa che giunge sulla superficie vetrata e di conseguenza un ingresso energetico inferiore all'interno degli ambienti interni.[13]

La contestualizzazione gioca come sempre un ruolo fondamentale nella scelta del sistema da adottare per un funzionamento ottimale del sistema nella sua globalità.

---

[12] Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. Solar Energy Mater Solar Cells 2010 2;94(2):87-105.

[13] Freewan AAY. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. Solar Energy 2014 4;102:14-30.

Spetta quindi al progettista effettuare le opportune analisi a riguardo per fornire al cliente soluzioni che rispettino i requisiti funzionali, termici, igrometrici e luminosi per una sensazione di comfort a 360°.

9.2. CONFIGURAZIONE E SISTEMA DI OSCURAMENTO ADOTTATO

L'edificio in analisi rappresenta un intervento di riqualificazione di un centro direzionale telefonico in un complesso multifunzionale adibito a sede principale del parco tecnologico di Baku.

L'ottimizzazione del complesso edilizio è stata effettuata partendo da una situazione iniziale caratterizzata da documentazione fotografica ed elaborati architettonici.

Il processo di ottimizzazione è partito da degli obiettivi posti alla base della progettazione; sono stati definiti obiettivi sia dal punto di vista funzionale/spaziale che dal punto di vista prestazionale.

Gli spazi interni, composti inizialmente da locali ufficio serviti da corridoi centrali come connettivi di distribuzione, sono stati rielaborati riducendo al minimo le partizioni interne a favore di ampi spazi open space che garantissero maggiore comunicazione tra gli utenti e maggiore flessibilità di disposizione degli spazi lavorativi. La scelta è stata adottata anche per favorire prestazioni di illuminamento degli ambienti attraverso luce naturale, al fine di ottenere risparmi economici sul consumo elettrico globale dell'edificio ma anche benefici in termini di benessere degli utenti.

Il recupero dell'edificio è stato effettuato analizzando anche i fabbisogni energetici stagionali. Partendo dalla situazione di fabbisogno energetico iniziale sono state effettuate considerazioni migliorative delle prestazioni di involucro (opaco e trasparente) per l'ottenimento di fabbisogni più limitati ed efficienti.

La modellazione del progetto è stata realizzata tramite OpenStudio come interfaccia grafica a supporto del software di calcolo EnergyPlus.

L'impostazione di EnergyPlus ha permesso di effettuare analisi di tipo parametrico intervenendo sui principali elementi d'involucro caratterizzanti il fabbisogno energetico dell'edificio.

In particolare l'analisi si è sviluppata in un processo a cascata nel quale a partire dal primo parametro analizzato si è proceduto nella variazione progressiva di tutti i successivi parametri in modo tale da avere una visione globale di tutte le combinazioni ottenibili.

Le simulazioni effettuate sono state organizzate nel seguente procedimento:

- 3 configurazioni di trasmittanza delle superfici opache (Uop=0.4-0.3-0.2 W/m^{2}K);
- A ciascuna configurazione di Uop sono state associate 4 configurazioni differenti di trasmittanza di superficie trasparente (Uw=1.5-1.3-1.1-0.9 W/m^{2}K);

- A ciascuna combinazione di Uop e Uw sono state associate 6 differenziazioni di trasmittanza solare g del vetro (g=0.6-0.5-0.3-0.2-0.1-0.05);
- A ciascuna combinazione di Uop, Uw e g sono state associate 3 differenziazioni di superficie vetrata (Af=25-50-80%).

Sono state quindi ottenute 216 nuove combinazioni dei parametri coinvolti da cui si sono estrapolate le condizioni ritenute più vantaggiose rispetto agli obiettivi prefissati.

La combinazione ritenuta migliore è caratterizzata da un involucro composto da una percentuale di superficie opaca pari al 20%, caratterizzata da una trasmittanza Uop=0.3 W/m^2K, in quanto si è riscontrato un miglioramento delle prestazioni minimo spostandosi verso trasmittanze ulteriormente piccole (al di sotto del 3%) .

La componente vetrata dell'involucro adottata è caratterizzata da una superficie vetrata pari all'80%, caratterizzata da valori di trasmittanza pari a Uw=0.9 W/m^2K e g=0.3.

Il valore di g ottimizzato ha permesso di avere una convenienza della configurazione ad ampie superfici vetrate durante il periodo invernale grazie allo sfruttamento degli apporti solari; il comportamento tuttavia ha inciso sulle prestazioni di fabbisogno estivo.

È stato pertanto necessario valutare l'utilizzo di schermature solari tali da valorizzare gli apporti solari invernali garantendo al contempo un controllo di essi nel periodo estivo.

Per ottimizzare il comportamento estivo del fabbisogno energetico a seguito della variazione del rapporto tra area opaca e area trasparente d'involucro, sono state simulate 3 tipologie di dispositivi di oscuramento: il sistema a lamelle esterne, il sistema a tende esterne, il sistema con rete a maglia metallica esterna.

La decisione di inserire il dispositivo di oscuramento all'esterno è dovuto ad una migliore prestazione in termini di controllo del flusso termico solare.

Il sistema di oscuramento utilizzato per ottimizzare il caso estivo è risultato essere la configurazione a lamelle, sia per i vantaggi energetici che per gli aspetti pratici di funzionamento e di regolabilità. Tramite l'ottimizzazione dei parametri da cui è composta, la soluzione oscurante a lamelle permette di ottenere delle configurazioni che, oltre ad avere adeguate prestazioni termiche in termini di fabbisogno, garantissero anche l'adeguato ingresso di luce naturale impostato come valore di progetto pari a 500 lux; il corretto livello di illuminamento è un fattore determinante nel complessivo risparmio del consumo elettrico dovuto a utilizzo di luce artificiale lungo tutto l'arco di vita del fabbricato.

Si è proceduto inoltre nel mantenere sotto controllo il valore dell'indice di abbagliamento per non creare situazioni di discomfort degli utenti: tale valore è risultato essere sempre inferiore alla soglia sopportabile del valore pari a 22.

L'ottimizzazione del sistema di oscuramento ha condotto a 3 configurazioni differenti per larghezza della lamella, passo tra le lamelle, direzione di sviluppo delle lamelle (orizzontale o verticale) e distanza dal vetro.
Le tre soluzioni ottenute sono: sistema a listelli, a lamelle orizzontali, a lamelle verticali.
I valori di illuminamento riscontrati non hanno raggiunto i requisiti imposti da progetto.
Le tre configurazioni di oscuramento sono state quindi ottimizzate al fine di garantire una percentuale di penetrazione della luce visibile attraverso il sistema stesso, assumendo per ciascuna una trasmittanza visibile pari a τ_v=0.5.
Ciò ha permesso di considerare la condizione di illuminamento di progetto valida per le soluzioni adottate.
La casistica finale è stata infine valutata anche ai fini pratici:
la difficoltà di pulizia, l'eccessiva vicinanza al vetro del sistema di oscuramento, la difficoltà di manutenzione a causa dei numerosi elementi presenti nella configurazione a listelli rispetto alle lamelle orizzontali e verticali ha condotto a scartare l'ipotesi caratterizzata da sistema a listelli.

La scelta tra le ipotesi è stata valutata anche in termini di visibilità e di percezione di ostruzione della visuale esterna da parte dell'utenza interna.
È risultata essere di minor influenza sulla visibilità periferica degli utenti, seduti alle postazioni di lavoro per la maggior parte della giornata, la soluzione a lamelle orizzontali. Queste motivazioni hanno contribuito alla scelta finale delle lamelle a configurazione orizzontale.
Il posizionamento orizzontale permette inoltre una migliore condizione di alloggiamento di eventuali sistemi fotovoltaici garantendo l'ulteriore sfruttamento degli apporti di tipo solare come fonte di energia rinnovabile.

È bene tenere presente che le soluzioni adottate sono specifiche del contesto climatico tipico di Baku e le migliorie apportate si riferiscono e sono adattate ad un edificio già presente, con condizioni di orientamento già prestabilite; non si può prescindere da tali caratteristiche qualora si decidesse di adottare un differente posizionamento dell'edificio in altra località, con diverse condizioni climatiche. Le caratteristiche ambientali che fungono da condizioni al contorno del sistema sono essenziali per una corretta progettazione di involucro e dell'edificio stesso in generale.

9.3. POSSIBILI RISVOLTI FUTURI

I risvolti che la tesi proposta potrebbe sviluppare ulteriormente per spunti futuri possono essere sviluppati ulteriormente:

uno spunto di rilevante interesse sarebbe valutare il comportamento dei fabbisogni a seguito di una trasposizione del medesimo edificio in diversi contesti climatici, ponendo grande cura e attenzione a quanto possano influire su di esso temperature differenti, o ad esempio variazioni di orientamento e/o dimensione dell'edificio. Questo tipo di analisi permetterebbe di rilevare la funzionalità e l'efficienza di una determinata soluzione progettuale propria e adatta esclusivamente alle condizioni in cui si desidera innestare il complesso edilizio.

Le ottimizzazioni che si potrebbero ottenere fornirebbero ulteriori informazioni inerenti alle possibilità potenziali di una trasposizione di uno stesso modello nei diversi climi, di individuarne le specifiche problematiche e di avviare possibili miglioramenti progressivi.

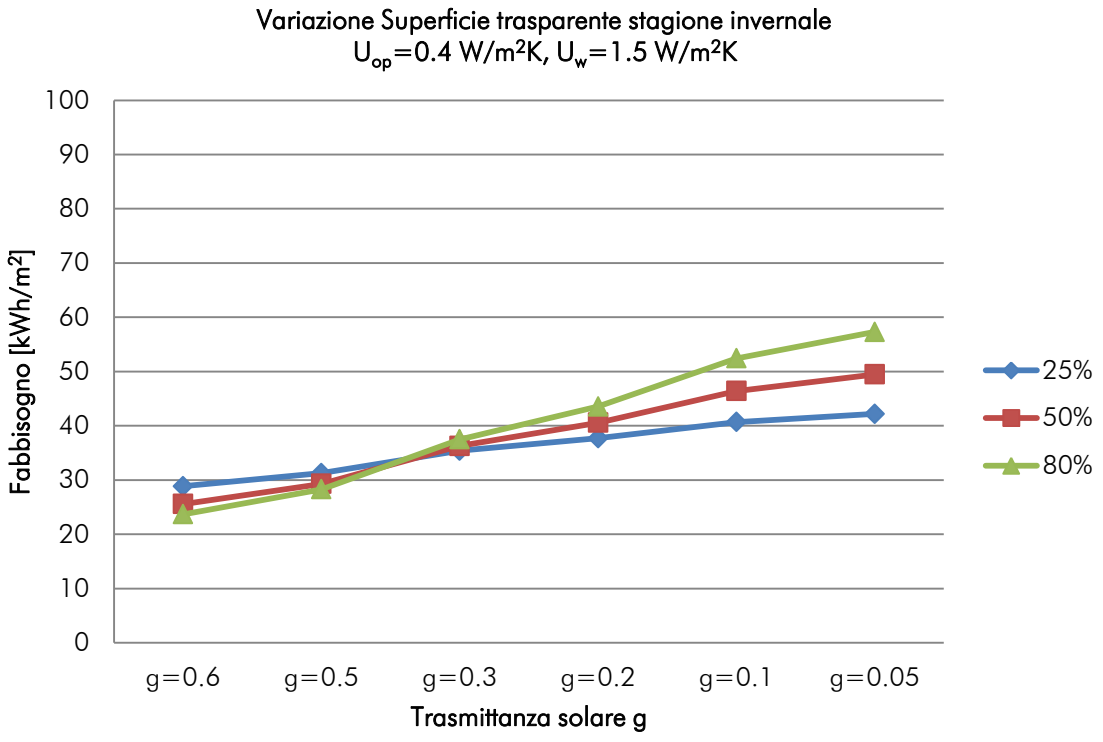
Si potrebbero notare i diversi comportamenti e le diverse soluzioni adottate a seconda della contestualizzazione dell'edificio, valutando le potenzialità e l'efficacia di un'ottimizzazione affrontata in modo parametrico di fronte a differenti situazioni di clima: freddo, temperato, caldo-secco, caldo-umido.

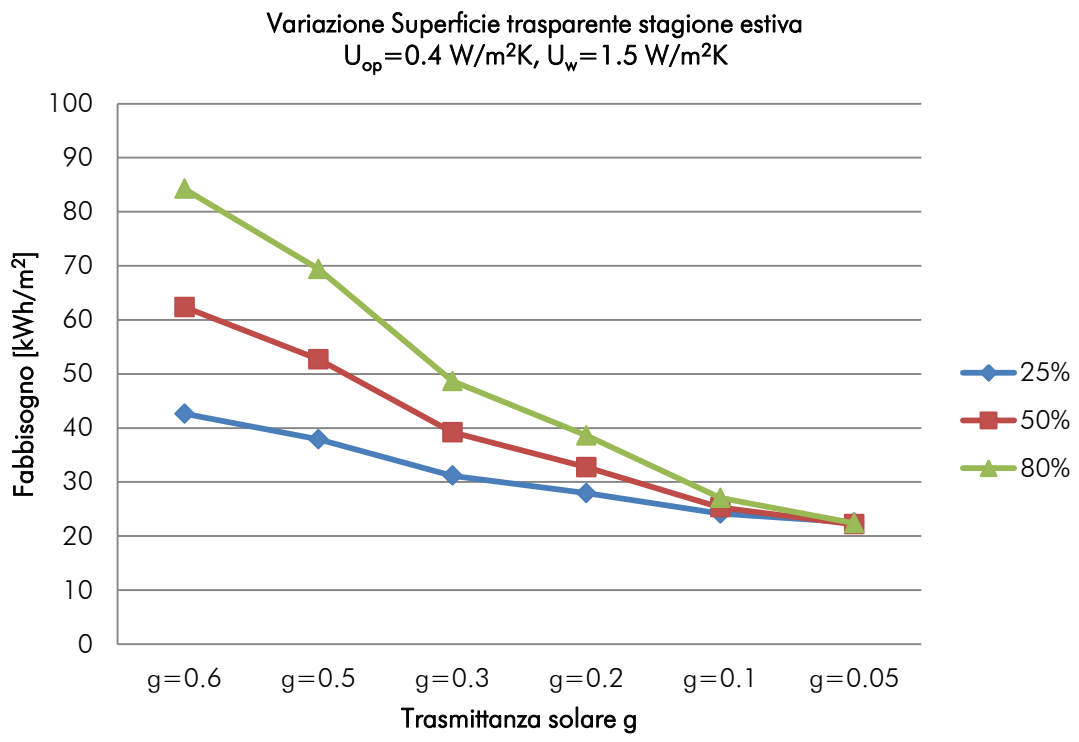
Questo tipo di analisi, permetterebbe una riduzione delle tempistiche progettuali e le soluzioni adottate non sarebbero lasciate all'aleatorietà del caso ma puntualmente calibrate all'esigenza richiesta.

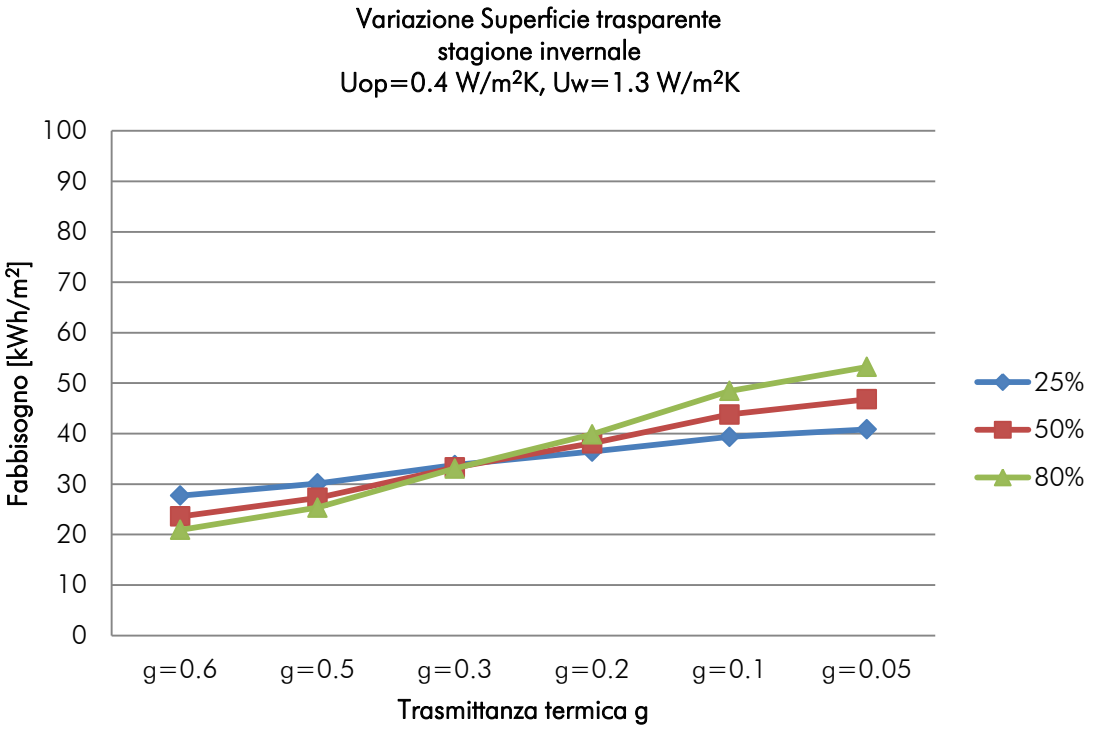
Delle analisi più veloci e meccanizzate sono possibili attraverso particolari algoritmi, come ad esempio l'ottimizzazione Particle Swarm, con i quali, associando delle funzioni obiettivo (ad esempio la minimizzazione della potenza annua di risaldamento, raffrescamento, illuminazione), si riescono ad individuare all'interno di un insieme ampio di combinazioni parametriche, soluzioni che rispettino le funzioni obiettivo impostate. Questa tipologia di algoritmo permette di effettuare simulazioni che coinvolgono più parametri: si potrebbe arrivare a definire in modo agevole l'ottimizzazione dei diversi orientamenti di un edificio, distinguendone la percentuale di superficie vetrata ottimale, il tipo di vetro in termini di trasmittanza e fattore solare g ottimali in funzione del posizionamento dei serramenti.

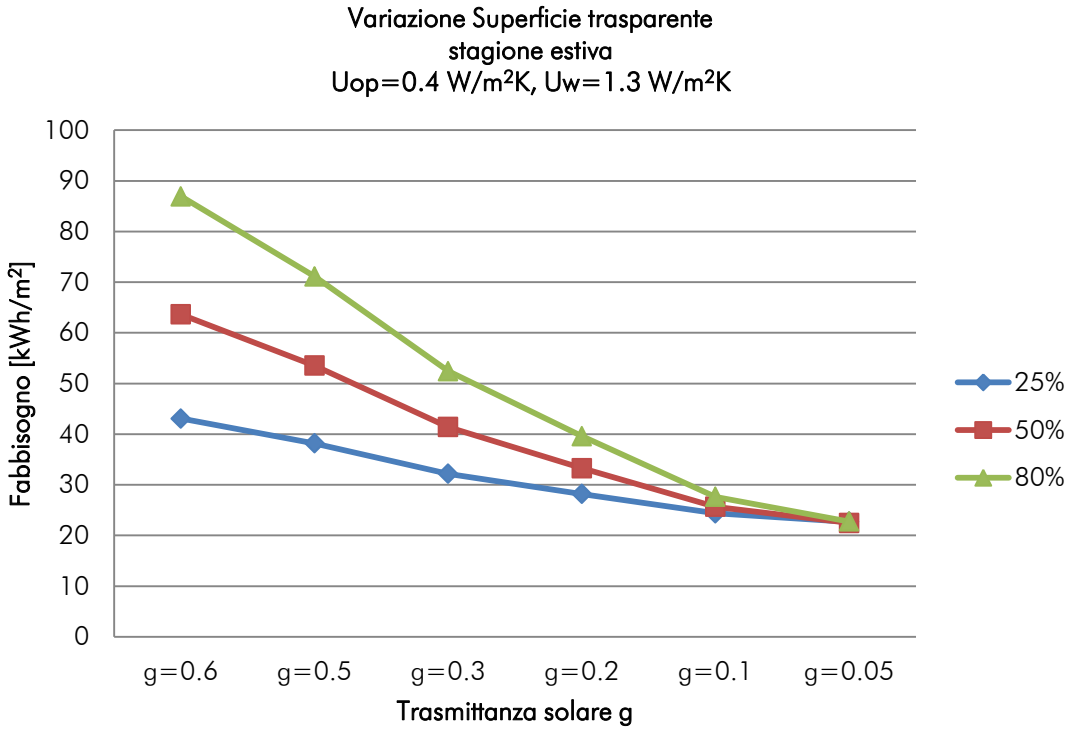
ALLEGATI

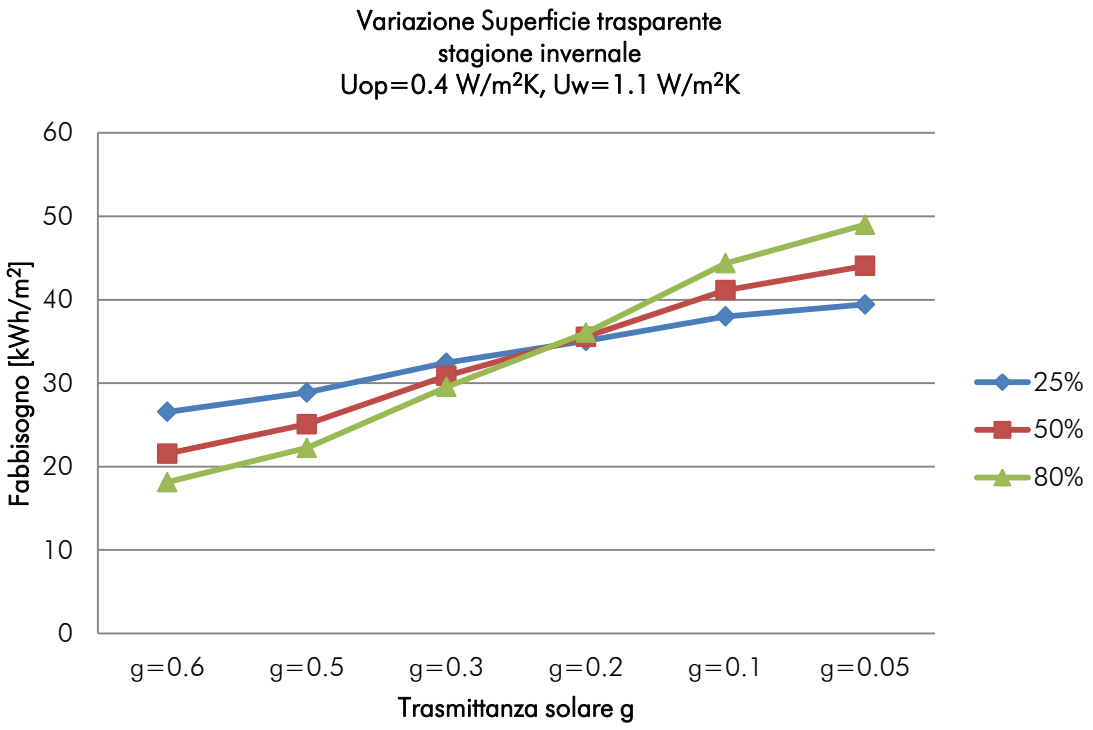
1. Valutazione fabbisogni al variare delle superfici trasparenti per le diverse combinazioni parametriche

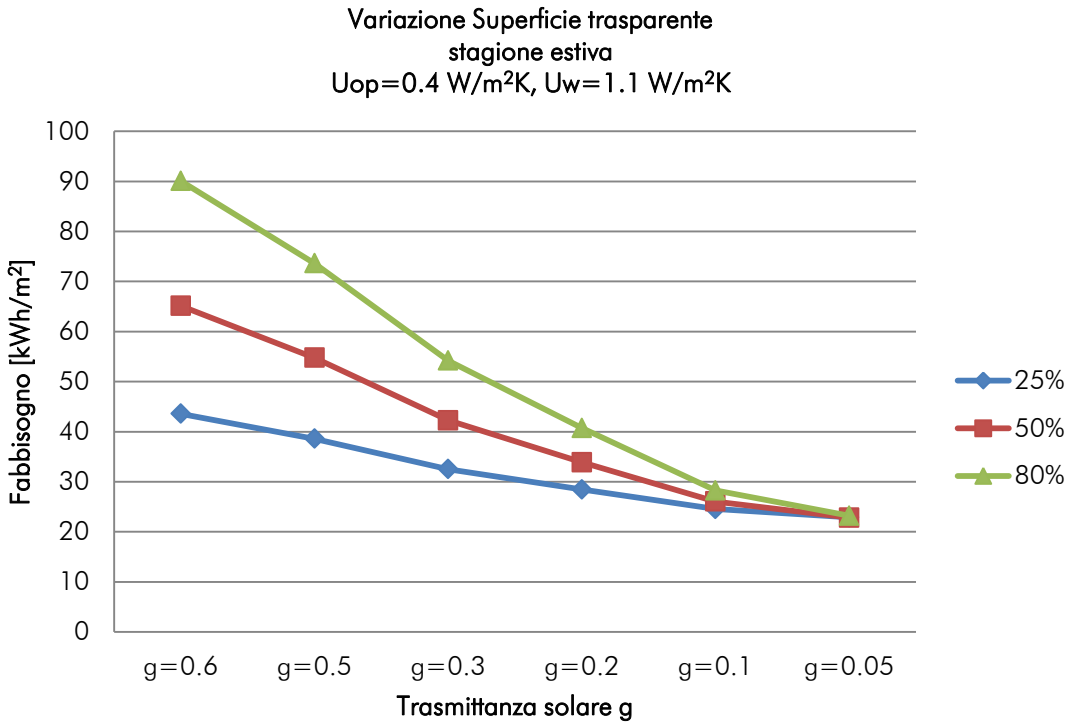


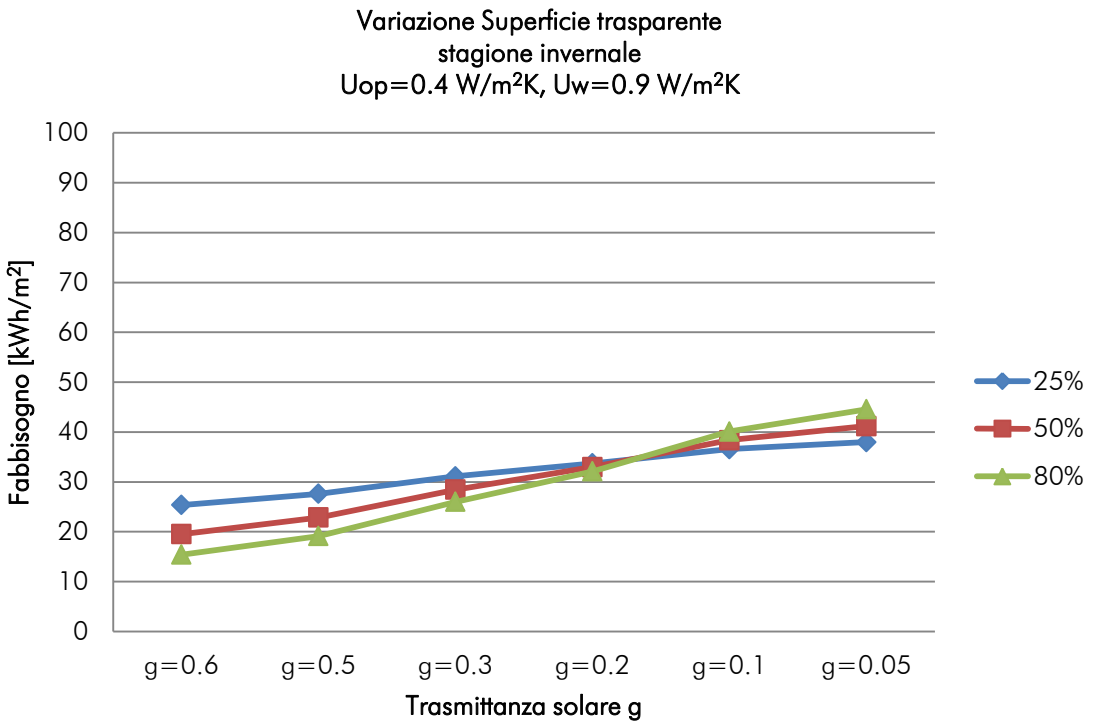


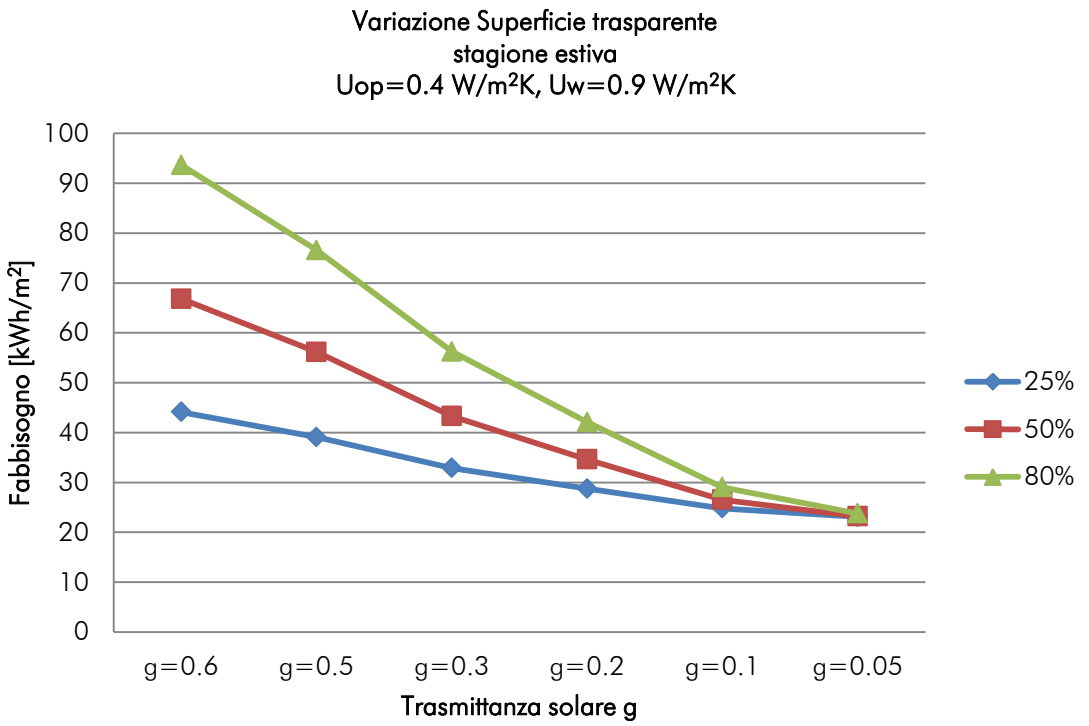

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza termica g
25%
50%
80%

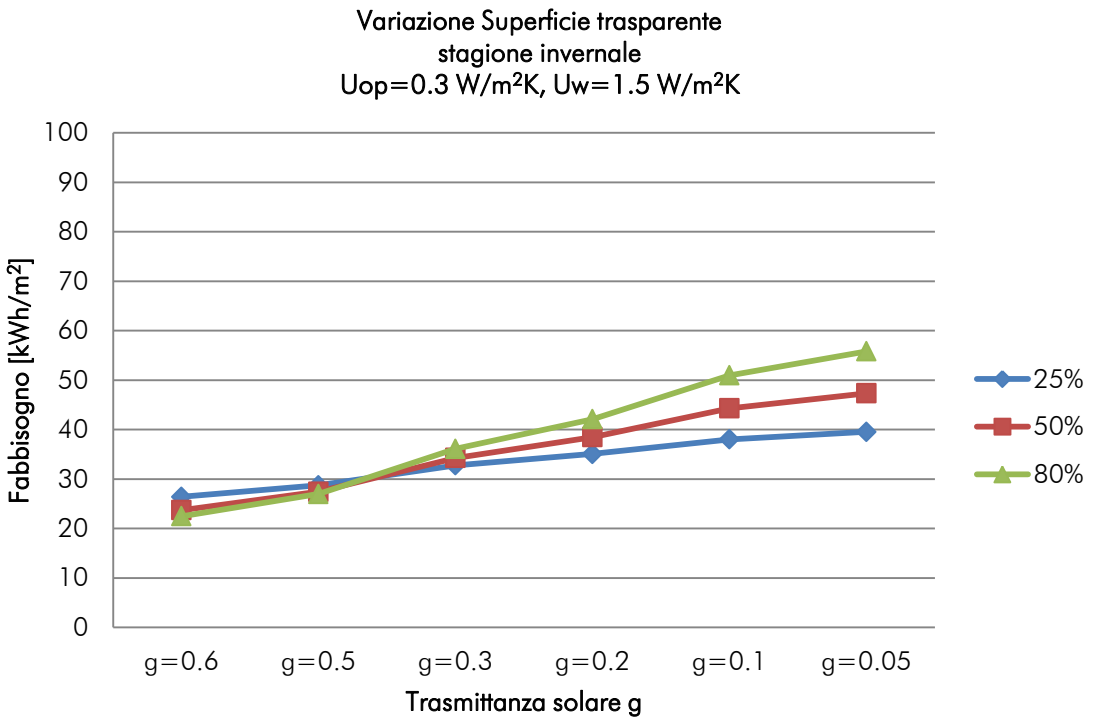

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

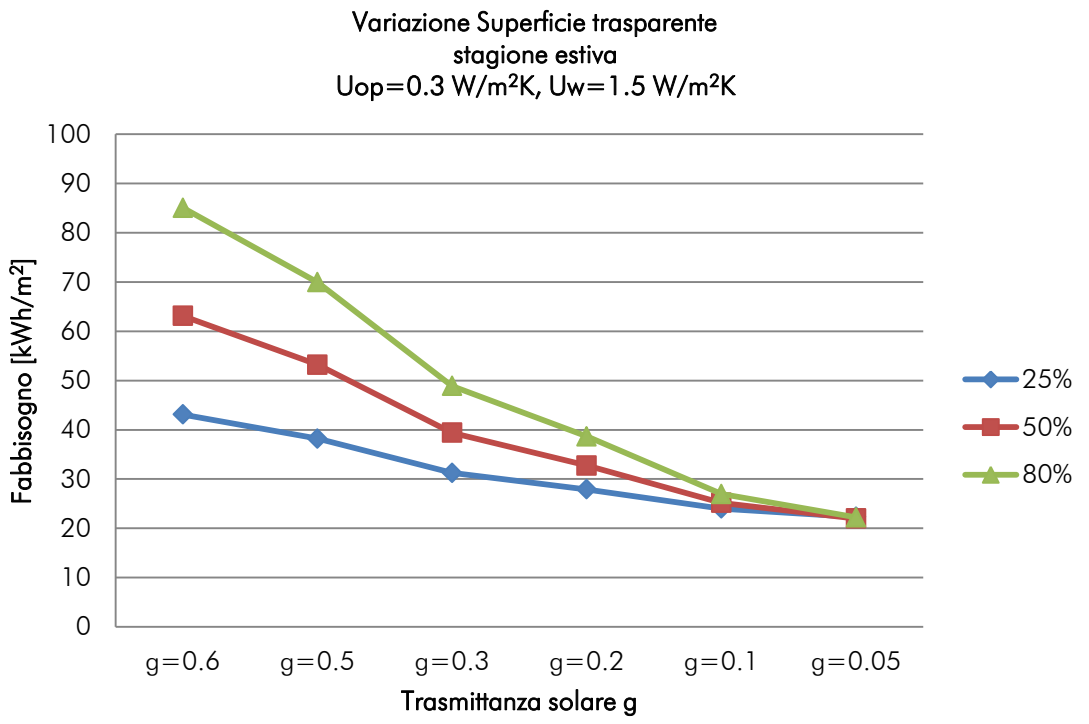

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

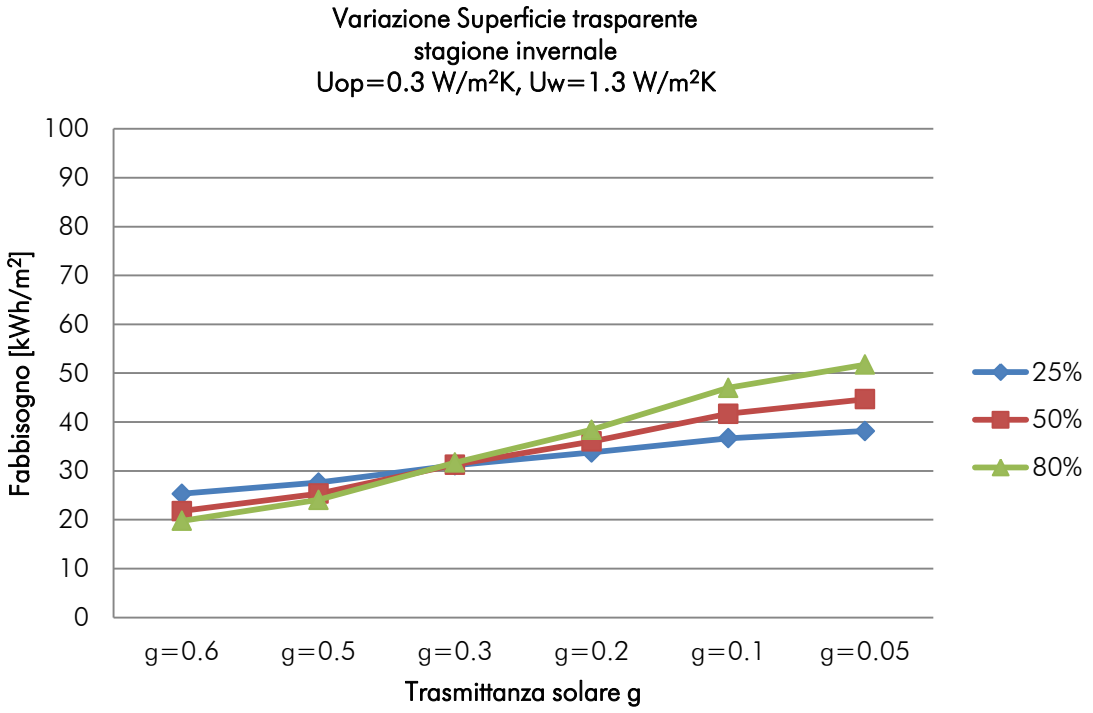

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.4 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

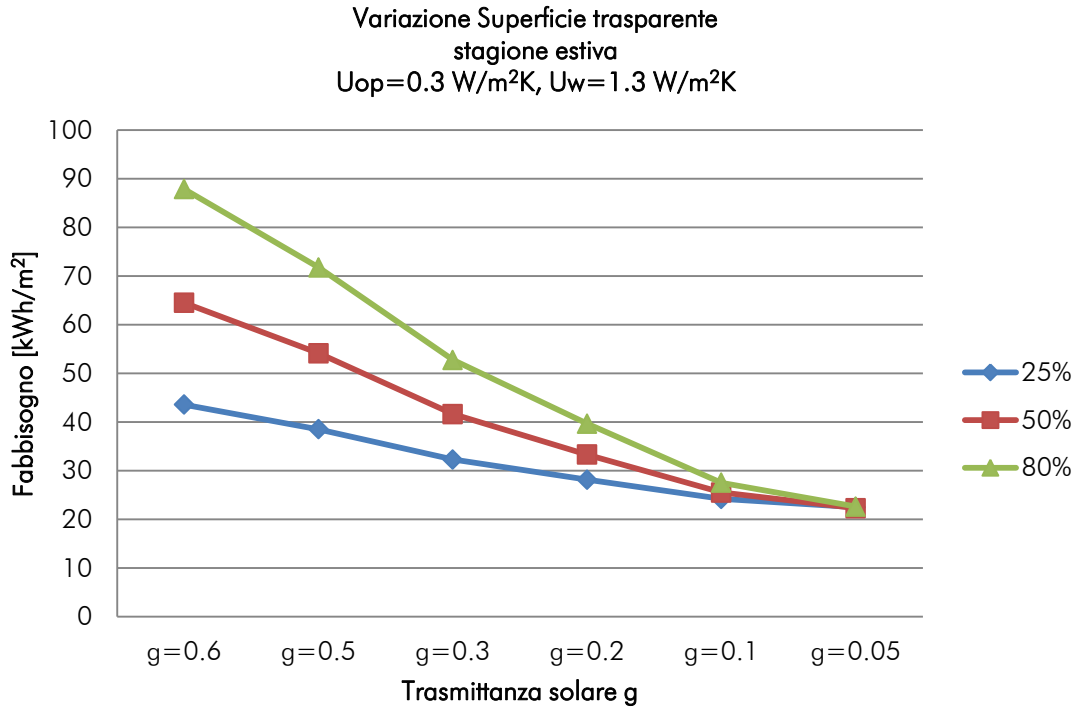

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.4 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

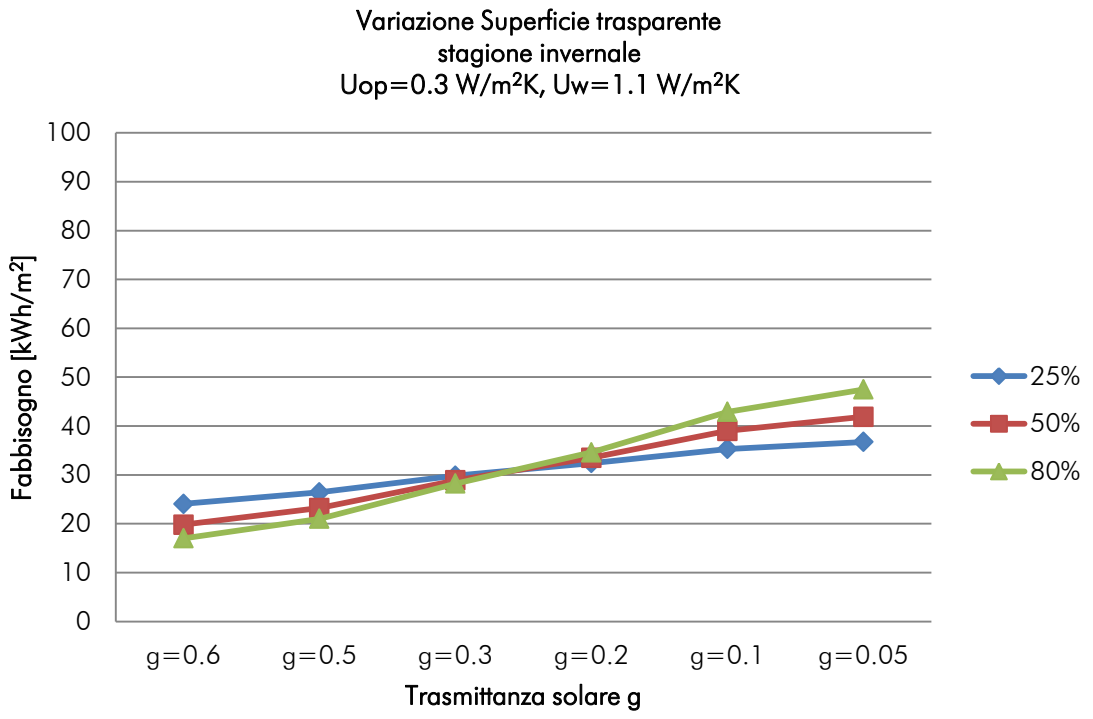

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.4 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

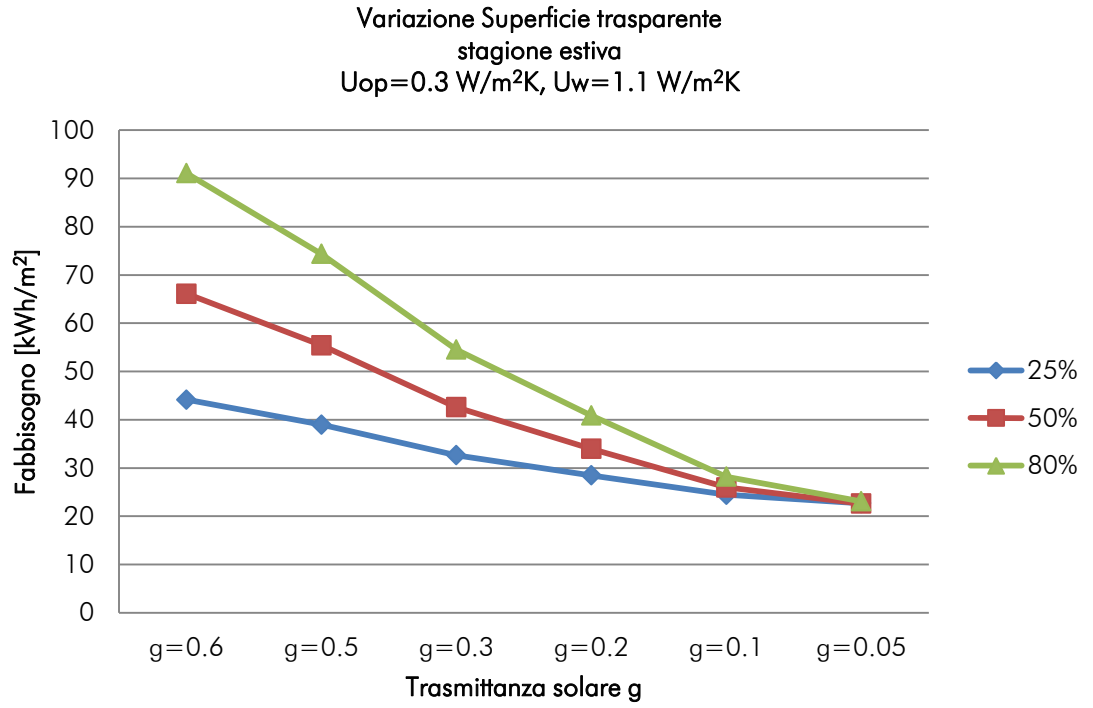

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

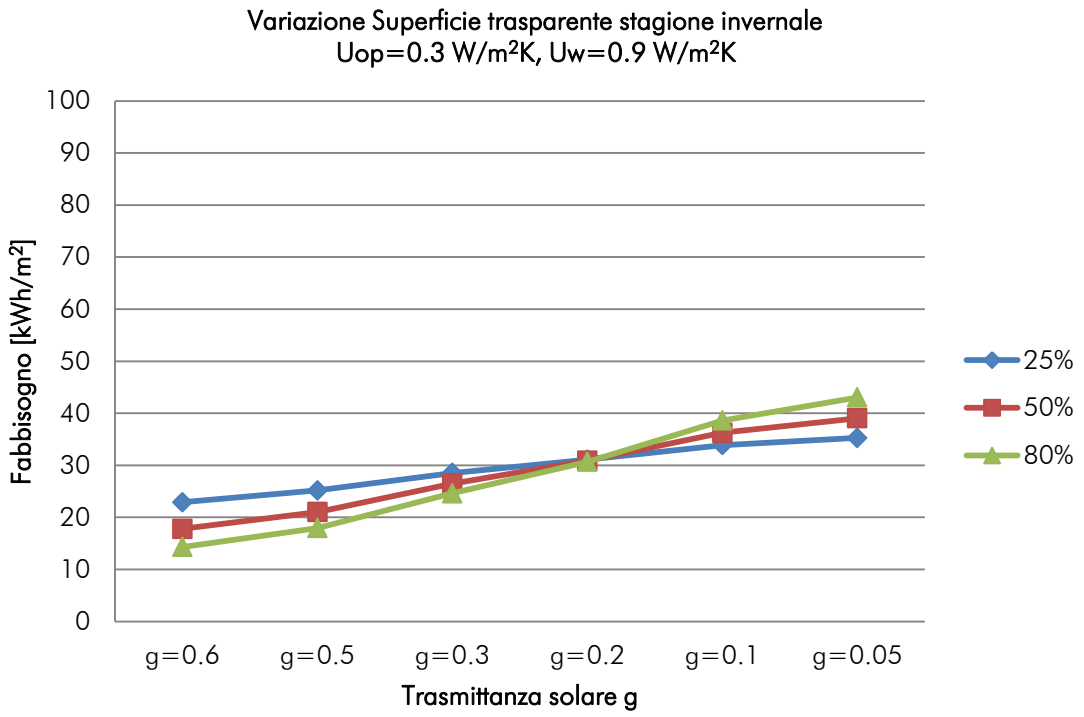

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

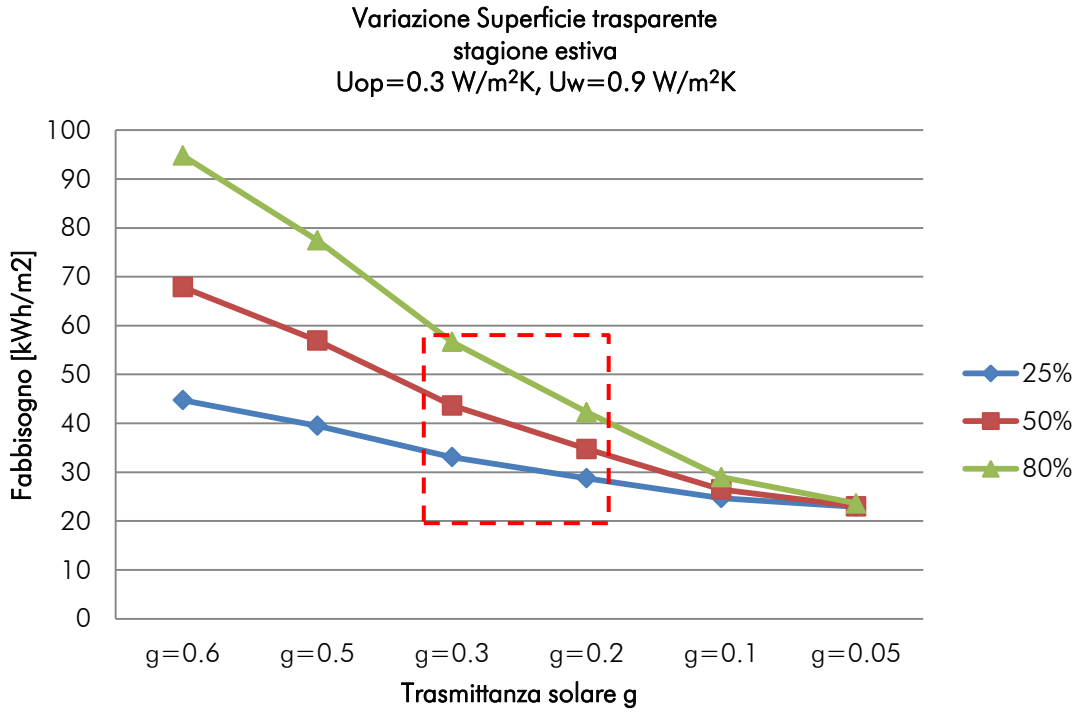

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

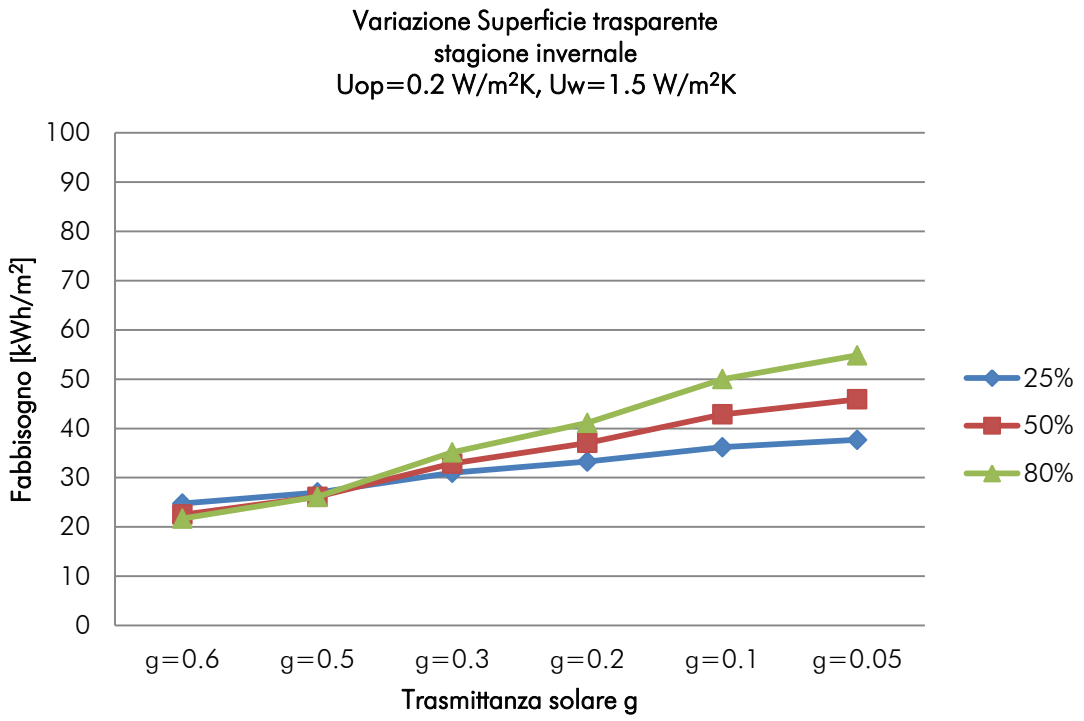

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

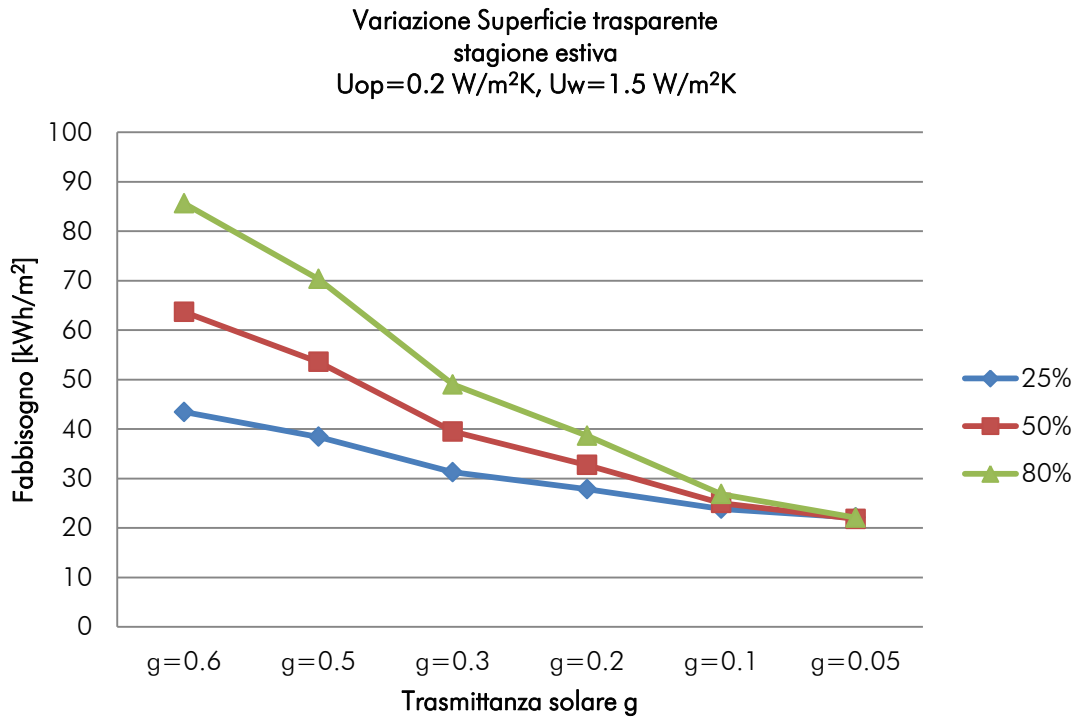

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

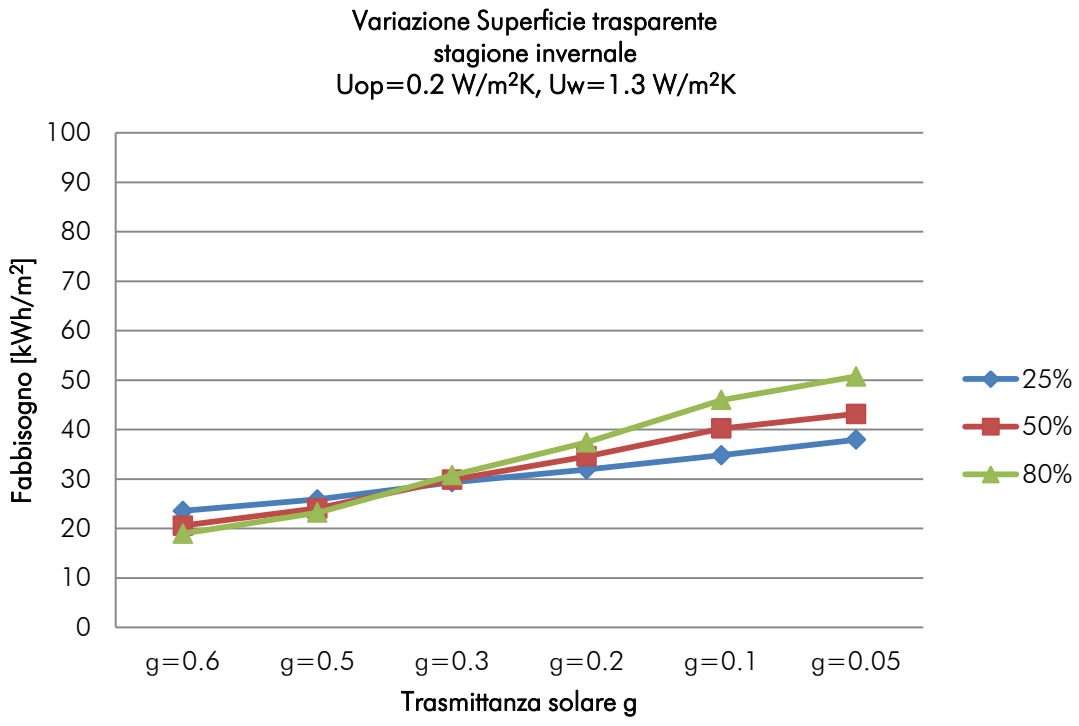

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.3 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

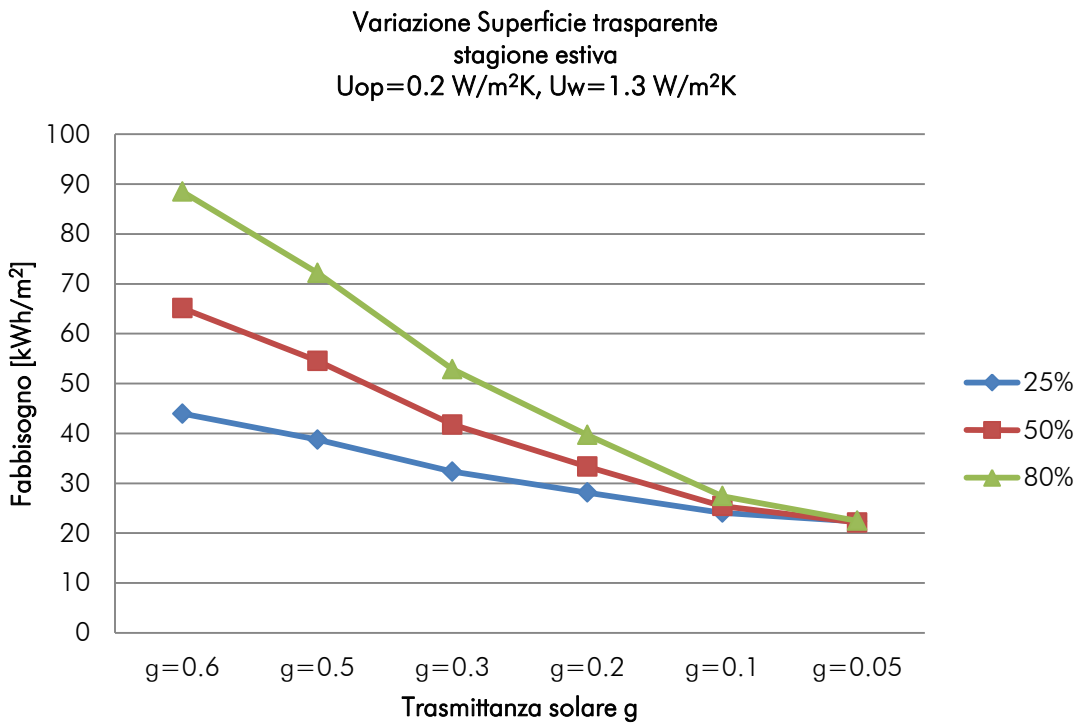

Variazione Superficie trasparente stagione invernale
Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

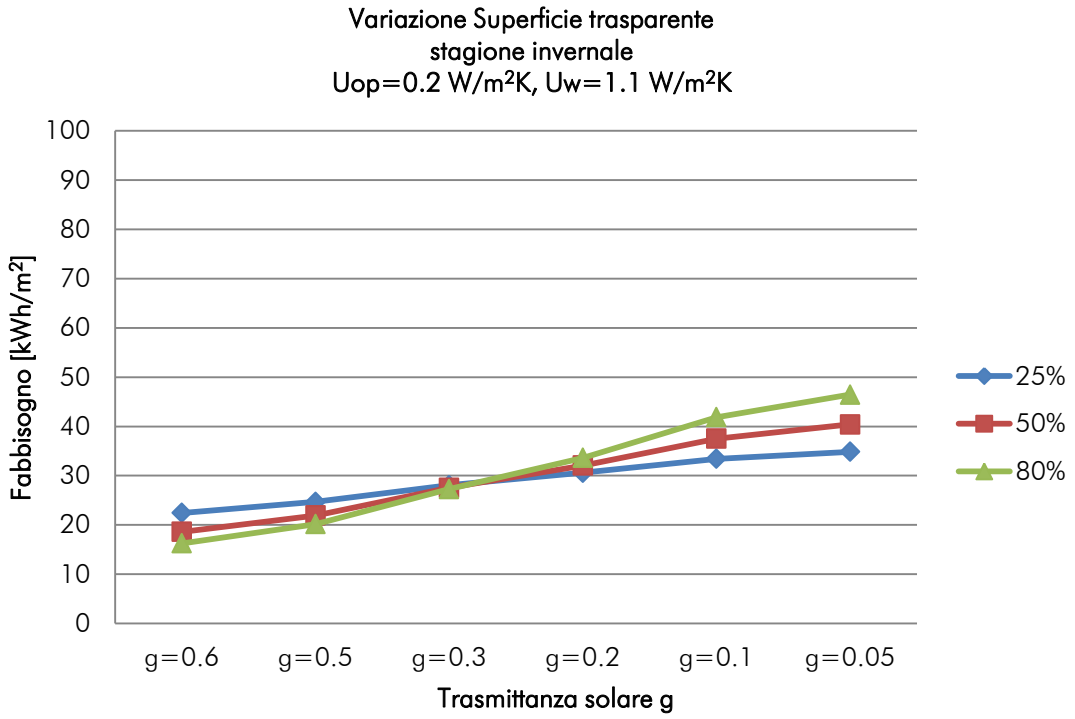

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.3 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m2]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

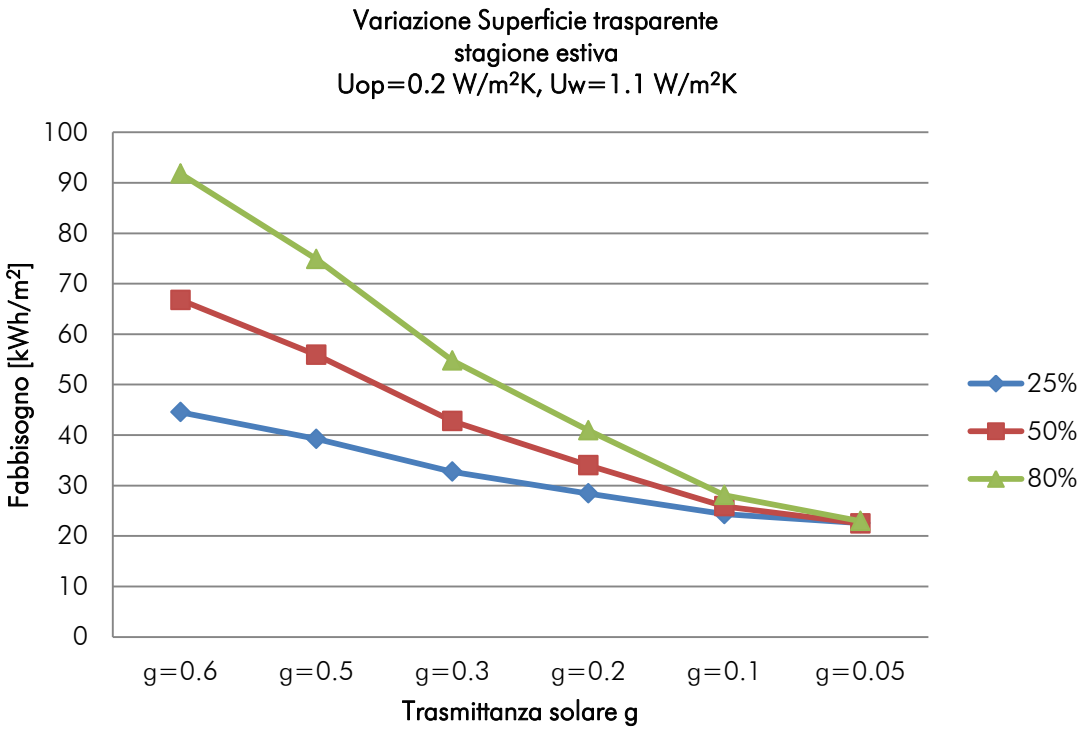

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

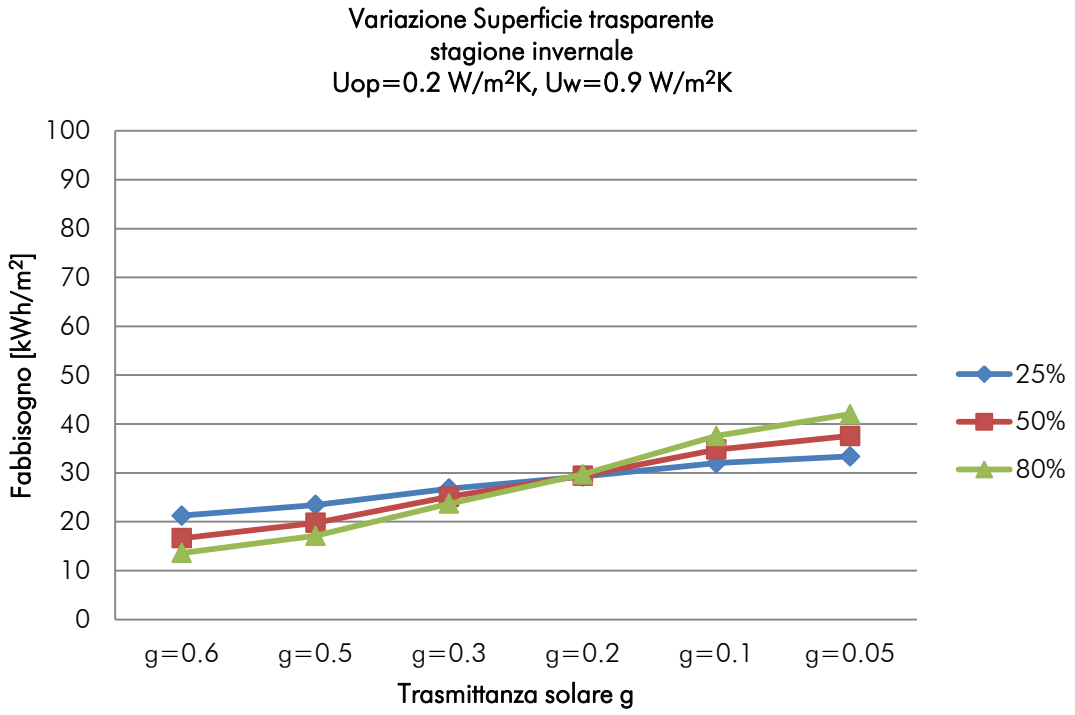

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.5 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

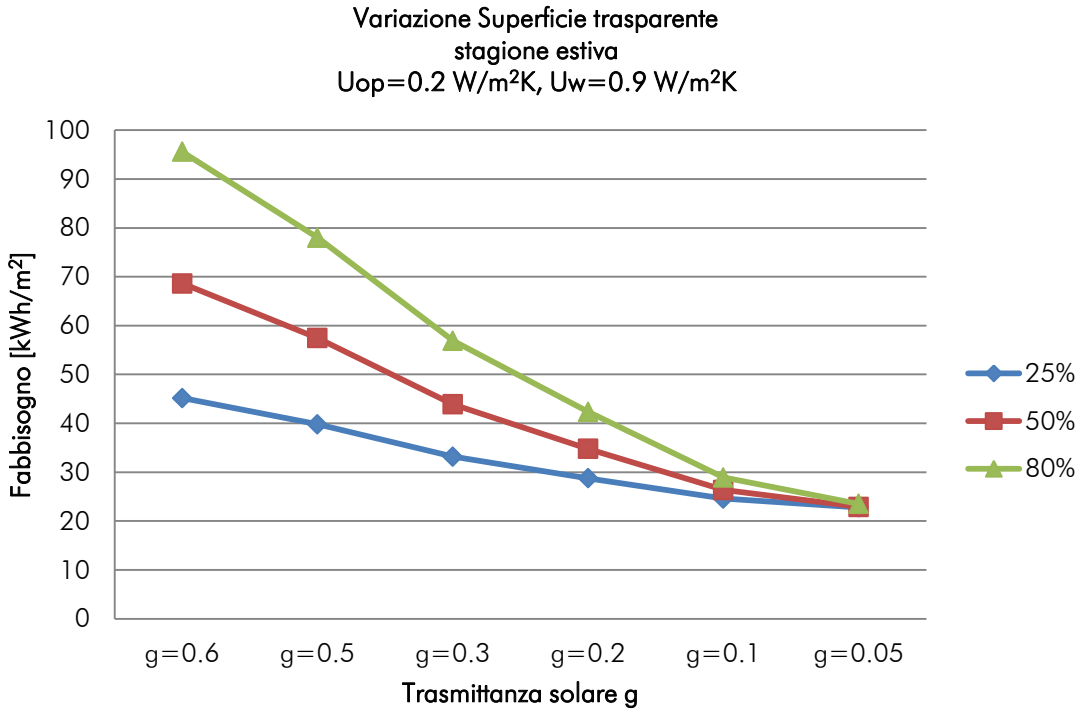

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%


Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.3 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

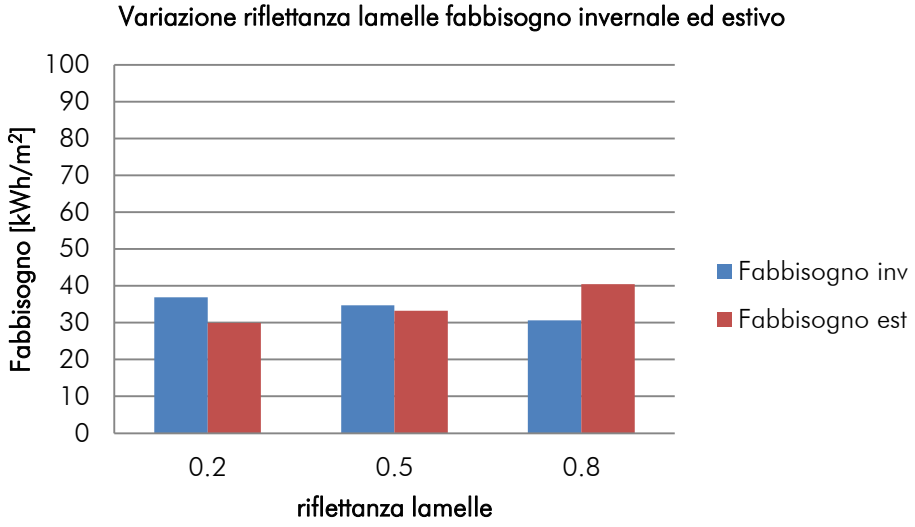

Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

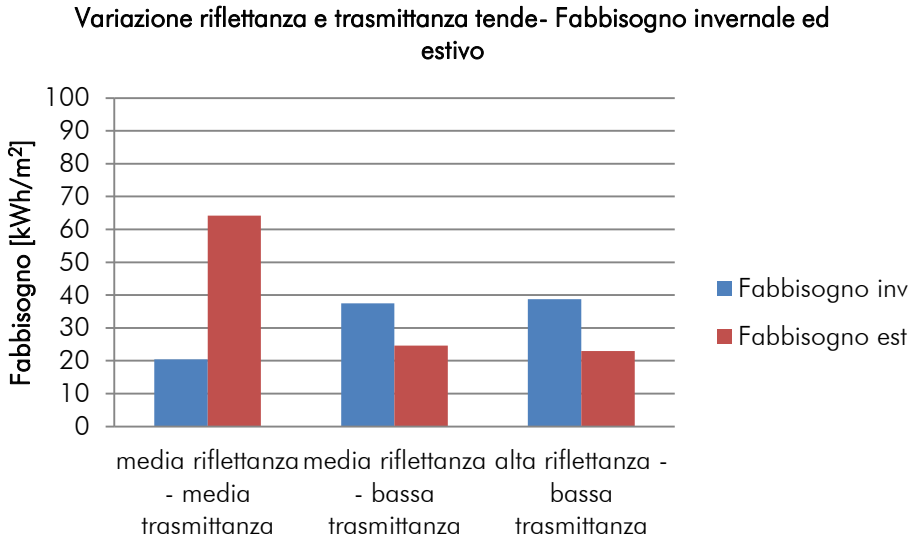

Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.2 W/m²K, Uw=1.1 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%


Variazione Superficie trasparente
stagione invernale
Uop=0.2 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%


Variazione Superficie trasparente
stagione estiva
Uop=0.2 W/m²K, Uw=0.9 W/m²K
Fabbisogno [kWh/m²]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
g=0.6
g=0.5
g=0.3
g=0.2
g=0.1
g=0.05
Trasmittanza solare g
25%
50%
80%

2. Valutazione fabbisogni al variare del sistema di oscuramento (lamelle e tende)





BIBLIOGRAFIA

Abdul Mujeebu M, Alshamrani OS. Prospects of energy conservation and management in buildings – The Saudi Arabian scenario versus global trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016 5;58:1647-1663.

Abdul Mujeebu M, Ashraf N, Alsuwayigh A. Energy performance and economic viability of nano aerogel glazing and nano vacuum insulation panel in multi-story office building. Energy 2016 10/15;113:949-956.

Atzeri A, Cappelletti F, Gasparella A. Internal Versus External Shading Devices Performance in Office Buildings. Energy Procedia 2014 2014;45:463-472.

Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. Solar Energy Mater Solar Cells 2010 2;94(2):87-105.

Belakehal A, Tabet Aoul K, Bennadji A. Sunlighting and daylighting strategies in the traditional urban spaces and buildings of the hot arid regions. Renewable Energy 2004;29(5):687-702.

Bellia L, Marino C, Minichiello F, Pedace A. An Overview on Solar Shading Systems for Buildings. Energy Procedia 2014 2014;62:309-317.

Boyano A, Hernandez P, Wolf O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. Energy Build 2013 10;65:19-28.

Bunning ME, Crawford RH. Directionally selective shading control in maritime sub-tropical and temperate climates: Life cycle energy implications for office buildings. Build Environ 2016 8/1;104:275-285.

Chou D, Chang C, Chang J. Energy conservation using solar collectors integrated with building louver shading devices. Appl Therm Eng 2016 1/25;93:1282-1294.

Dussault J, Sourbron M, Gosselin L. Reduced energy consumption and enhanced comfort with smart windows: Comparison between quasi-optimal, predictive and rule-based control strategies. Energy Build 2016 9/1;127:680-691.

EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; 2007.

EnergyPlus™, Input Output Reference, 2016

EnergyPlus™, Engineering Reference, 2016

Fasi MA, Budaiwi IM. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. Energy Build 2015 12/1;108:307-316.

Freewan AAY. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. Solar Energy 2014 4;102:14-30.

Goia F. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. Solar Energy 2016 7;132:467-492.

Gomes MG, Rodrigues AM, Bogas JA. Numerical and experimental study of the optical properties of venetian blinds. Journal of Building Physics 2012;36(1):7-34.

Gomes MG, Santos AJ, Rodrigues AM. Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical, experimental and blind control study. Build Environ 2014 1;71:47-59.

Hee WJ, Alghoul MA, Bakhtyar B, Elayeb O, Shameri MA, Alrubaih MS, et al. The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015 2;42:323-343.

Huang Y, Niu J, Chung T. Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. Appl Energy 2014 12/1;134:215-228.

Planning of sustainable cities in view of green architecture. 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, GBSC 2011, September 15, 2011 - September 16; 2011; Bologna, Italy: Elsevier Ltd; 2011.

Ihara T, Gustavsen A, Jelle BP. Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. Appl Energy 2015 11/15;158:422-432.

Invidiata A, Ghisi E. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. J Clean Prod 2016 10/1;133:1371-1383.

Kim M, Leigh S, Kim T, Cho S. A study on external shading devices for reducing cooling loads and improving daylighting in office buildings. Journal of Asian Architecture and Building Engineering 2015;14(3):687-694.

Kirimtat A, Koyunbaba BK, Chatzikonstantinou I, Sariyildiz S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;53:23-49.

Konstantzos I, Tzempelikos A. Daylight glare evaluation with the sun in the field of view through window shades. Build Environ .

Lim Y, Kandar MZ, Ahmad MH, Ossen DR, Abdullah AM. Building façade design for daylighting quality in typical government office building. Build Environ 2012 11;57:194-204.

Ma P, Wang L, Guo N. Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of envelope U-value and ambient temperature amplitude. Appl Energy 2015 5/15;146:84-91.

Mainini AG, Poli T, Zinzi M, Speroni A. Metal Mesh as Shading Devices and Thermal Response of an Office Building: Parametric Analysis. Energy Procedia 2015 November 2015;78:103-109.

Mandalaki M, Zervas K, Tsoutsos T, Vazakas A. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. Solar Energy 2012 9;86(9):2561-2575.

Mangkuto RA, Rohmah M, Asri AD. Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. Appl Energy 2016 2/15;164:211-219.

Pomponi F, Farr ERP, Piroozfar P, Gates JR. Façade refurbishment of existing office buildings: Do conventional energy-saving interventions always work? Journal of Building Engineering 2015 9;3:135-143.

Saelens D, Parys W, Roofthooft J, de la Torre AT. Reprint of "Assessment of approaches for modeling louver shading devices in building energy simulation programs". Energy Build 2014 1;68, Part C:799-810.

Sanati L, Utzinger M. The effect of window shading design on occupant use of blinds and electric lighting. Build Environ 2013 6;64:67-76.

Shafaghat A, Keyvanfar A, Ferwati MS, Alizadeh T. Enhancing staff's satisfaction with comfort toward productivity by sustainable Open Plan Office Design. Sustainable Cities and Society 2015 12;19:151-164.

Sierra-Pérez J, Boschmonart-Rives J, Gabarrell X. Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. J Clean Prod 2016 2/1;113:102-113.

Singh MC, Garg SN. Energy rating of different glazings for Indian climates. Energy 2009 11;34(11):1986-1992.

Suk JY, Schiler M, Kensek K. Absolute glare factor and relative glare factor based metric: Predicting and quantifying levels of daylight glare in office space. Energy Build 2016 10/15;130:8-19.

Sutter Y, Dumortier D, Fontoynont M. The use of shading systems in VDU task offices: A pilot study. Energy Build 2006 7;38(7):780-789.

Tian C, Chen T, Chung T. Experimental and simulating examination of computer tools, Radlink and DOE2, for daylighting and energy simulation with venetian blinds. Appl Energy 2014 7/1;124:130-139.

Tzempelikos A, Chan Y. Estimating detailed optical properties of window shades from basic available data and modeling implications on daylighting and visual comfort. Energy Build 2016 8/15;126:396-407.

Tzempelikos A, Shen H. Comparative control strategies for roller shades with respect to daylighting and energy performance. Build Environ 2013 9;67:179-192.

Tzempelikos A, Athienitis AK. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. Solar Energy 2007 3;81(3):369-382.

UNI TS 11300-1:2008: Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

Valiyev A. Baku. Cities 2013 4;31:625-640.

van Moeseke G, Bruyère I, De Herde A. Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings. Build Environ 2007 2;42(2):784-793.

Yu X, Su Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation –A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015 12;52:494-503.