



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile

**ANALISI ENERGETICA DINAMICA DI ELEMENTI CHE COMPONGONO
L'INVOLUCRO EDILIZIO**

**DYNAMIC ENERGIIC ANALYSIS OF ELEMENTS MAKING UP THE BUILDING
ENVELOPE**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Di Perna Costanzo

Tesi di Laurea di:

Gaeta Francesco

A.A. 2018 /2019

Alla mia famiglia

Indice

1. Introduzione

- 1.1. Inquadramento della ricerca
- 1.2. Inquadramento Normativo
- 1.3. Scopo del lavoro

2. Allineamento dati climatici

- 2.1. Introduzione al software
- 2.2. Inserimento del file meteo
- 2.3. Primo Confronto

3. Creazione dell'edificio di studio

- 3.1. Inserimento dei materiali per le strutture opache
- 3.2. Inserimento dei materiali delle finestre
- 3.3 Modello di calcolo delle finestre di EnergyPlus
- 3.4 Applicazione dei materiali

4. Inserimento degli apporti termici della struttura

- 4.1 Apporti Interni (Internal Gains)
- 4.2 Apporti Solari (Solar Gains)
- 4.3 La radiazione solare
- 4.4 Valutazione degli apporti solari

5. Allineamento dei dati di ventilazione

- 5.1 Generalità sulla ventilazione
- 5.2 La ventilazione naturale
- 5.3 La ventilazione in EnergyPlus

6. I fabbisogni

6.1 Generalità

6.2 I Fabbisogni in EnergyPlus

7. Conclusioni

1. INTRODUZIONE

1.1 INQUADRAMENTO DELLA RICERCA

I cambiamenti climatici causati dalle emissioni in seguito al notevole impiego di fonti energetiche di origine fossile hanno ormai reso improcrastinabile il cambio di tendenza sul metodo culturale con cui è stata affrontata la progettazione edilizia negli ultimi trent'anni. Per questo diventa sempre più importante l'analisi degli aspetti energetici già in fase di progettazione, senza andare a considerare questa fase come successiva. Il progettista energetico deve essere in grado di applicare regole pratiche ed empiriche, derivate dalla propria esperienza e formazione, oltre ad adoperare gli opportuni strumenti di simulazione dettagliata per gestire e valutare correttamente gli effetti sul comportamento energetico dell'edificio a seguito delle azioni progettuali intraprese. I software di simulazione dinamica permettono di controllare le numerose variabili presenti in un sistema edificio-impianto; permettono di progettare un edificio con maggiore consapevolezza dei fenomeni energetici e di ottimizzare le scelte risparmiando sui consumi, costi di costruzione e di manutenzione. La simulazione energetica dinamica è quella disciplina che studia le complessità relative alle variabili dell'edificio tramite l'utilizzo di software avanzati che superano il metodo semplificato basato sul metodo semi-stazionario. L'utilizzo della simulazione dinamica è dovuto principalmente alla complessità della progettazione, al raggiungimento di alti livelli di efficienza energetica, al miglioramento di sistemi impiantistici, alla richiesta degli utenti di maggiore comfort e risparmio.

1.2 INQUADRAMENTO NORMATIVO

La direttiva UE 2018/844 del parlamento europeo e del consiglio del 30 maggio 2018 modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica degli edifici e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. L'Unione si impegna a sviluppare un sistema energetico sostenibile che permetta di ridurre del 40% le emissioni di gas serra entro il 2030 rispetto a quelle del 1990. Questa direttiva prevede che l'Unione si impegni ad elaborare un sistema energetico sostenibile competitivo, sicuro e decarbonizzato entro il 2050. Per rendere questo possibile gli stati membri devono adottare misure tese alla decarbonizzazione del parco immobiliare a cui è riconducibile circa il 36% delle emissioni di CO_2 nell'Unione. Per questo gli stati membri devono cercare un equilibrio tra i costi di decarbonizzazione dell'approvvigionamento energetico e la riduzione del consumo energetico finale. Per questo gli stati membri hanno bisogno di orientare le loro politiche in materia di efficienza energetica per conseguire obiettivi a breve (2030), medio (2040) e lungo (2050) termine. Questi obiettivi devono essere conseguiti incentivando la realizzazione di edifici ad energia quasi zero (Nearly Zero Energy Building, NZEB), e cioè

edifici che garantiscono un'elevata prestazione energetica con un basso fabbisogno energetico che viene coperto da fonti di energia rinnovabile.

1.2 SCOPO DEL LAVORO

Ormai da anni si parla dell'importanza dell'efficienza energetica degli edifici, questa attenzione all'efficienza è dovuta a molteplici fattori, sia economici, cioè che riguardano un effettivo risparmio in denaro nell'utilizzo degli impianti di riscaldamento e raffrescamento; mentre il secondo è di tipo ambientale, avendo edifici più efficienti e di conseguenza che hanno meno perdite e sprechi di energia si riesce a limitare l'utilizzo dell'energia necessaria al funzionamento degli impianti con un conseguente vantaggio dal punto di vista ambientale. L'obiettivo di questa tesi è quello di utilizzare il software EnergyPlus per svolgere la simulazione in regime dinamico di un edificio e confrontare i dati raccolti con quelli provenienti da altri software (TRNSYS) e dai calcoli svolti con le metodologie stabilite nella norma UNI 52016. In questo modo si sta cercando di capire l'accuratezza dell'algoritmo dinamico di calcolo della norma UNI 52016 in modo da arrivare ad avere un'efficienza energetica sempre più alta. Il lavoro si comporrà principalmente di 3 fasi: la prima nella quale dovranno essere allineati i dati climatici, poi nella seconda fase si passa ad allineare gli apporti solari, ed infine nell'ultima fase si procederà ad allineare le parti relative alla ventilazione ed ai fabbisogni energetici dell'edificio.

2. ALLINEAMENTO DEI DATI CLIMATICI

2.1 INTRODUZIONE AL SOFTWARE

Lo stato dell'arte in tema di simulazione energetica in regime dinamico degli edifici è attualmente rappresentato da EnergyPlus. EnergyPlus è un codice di calcolo open source sviluppato dal DOE (Department Of Energy, del Congresso degli USA), basato sui vecchi codici BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, sviluppati a partire dagli anni '80 per la modellazione energetica in regime dinamico del sistema edificio-impianto. EnergyPlus è un ambiente simulativo tra i più utilizzati al mondo, le capacità di calcolo e la validazione ultra-decennale dei risultati lo rendono uno dei più affidabili strumenti di simulazione dinamica dei sistemi edificio-impianti. È stato concepito per la necessità di fornire simulazioni energetiche integrate tra i carichi termici dell'edificio e le risposte dei sistemi impiantistici, per fornire accurate previsioni sulle temperature e sui livelli di comfort. Essendo principalmente un motore di calcolo gli input sono forniti tramite la compilazione di un file di testo. I carichi calcolati (da un solutore di bilancio termico) per intervalli temporali definiti dall'utente (per default ogni 15 minuti), vengono forniti al modulo di simulazione dei sistemi impiantistici nel medesimo intervallo di simulazione. Quest'ultimo determina ad intervalli di tempo variabili (fino ad 1 minuto se necessario) la risposta dei sistemi elettrici, di riscaldamento, e di raffrescamento. Tale procedura fornisce previsioni sulle temperature degli ambienti molto più accurate, cruciali sia per il dimensionamento di sistemi e generatori, sia per la valutazione del comfort degli occupanti. Tale solutore integrato consente all'utente di valutare in maniera più realistica l'efficacia dei sistemi di controllo, l'assorbimento ed il rilascio di umidità dei componenti edilizi, il comportamento dei sistemi radianti di riscaldamento e raffrescamento, la ventilazione ed i movimenti delle masse d'aria tra le zone termiche o provenienti dall'ambiente esterno. La struttura di EnergyPlus presenta due componenti di base: un solutore per i bilanci di calore e di massa ed uno per i sistemi impiantistici. Inoltre accorpa alcuni moduli sulla valutazione delle prestazioni dei componenti propri di LBNL, Window e DOE-2.1E, oltre ad un nuovo strumento per la valutazione di particolari sistemi di ottimizzazione della luce naturale (denominato DELight). Per la valutazione degli effetti della ventilazione naturale, implementa i moduli di COMIS, oltre ad ulteriori algoritmi specifici. Il software si basa sulla modellazione dell'edificio in zone termiche (definite come quelle porzioni di spazio a temperatura uniforme composte da un volume d'aria e dalle superfici che lo delimitano) e sulle seguenti condizioni di scambio termico: temperatura dell'aria uniforme all'interno della zona termica, temperatura uniforme di ogni superficie, irraggiamento uniforme ad alta e a bassa lunghezza d'onda, superfici uniformemente diffondenti e trasmissione monodimensionale del calore per conduzione. Per consentire il calcolo all'interno del modello deve essere inserito un file meteo in formato .epw che contiene i dati climatici dell'area nella quale l'edificio è collocato. Una volta lanciata la simulazione del modello di calcolo il

programma restituisce un file in formato .eso che contiene al suo interno tutti gli output richiesti secondo le preferenze dell'utente. Essendo EnergyPlus un simulatore non possiede un'interfaccia user-friendly

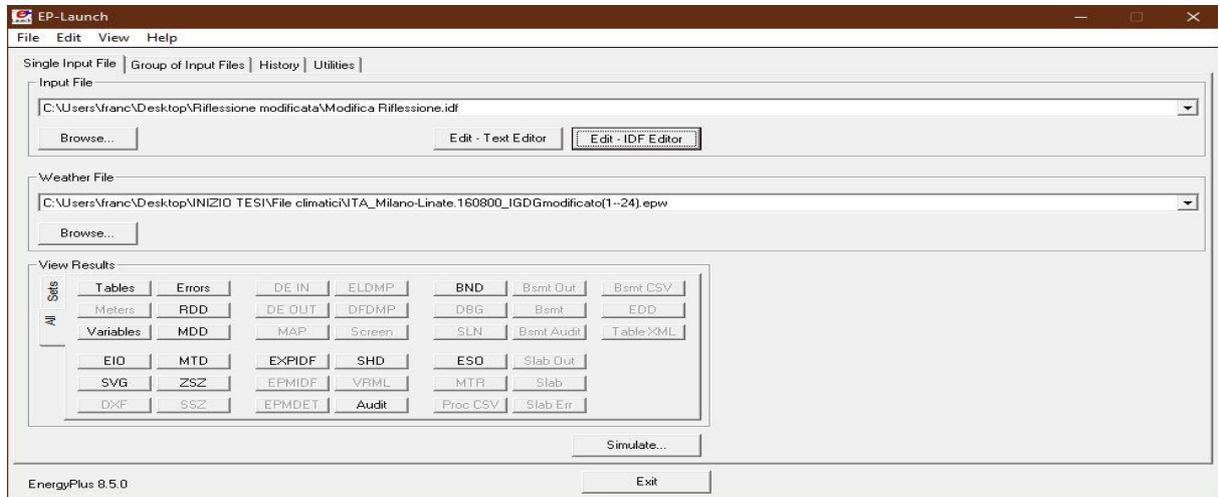


Figura 1. Interfaccia Grafica di EnergyPlus

Per questo motivo esistono dei progetti in corso per quanto riguarda lo sviluppo di interfacce grafiche. Di seguito se ne riporta una breve descrizione:

1. OpenStudio

Rappresenta il primo tentativo di fornire ad EnergyPlus un'interfaccia grafica completamente gratuita utilizzando come modellatore geometrico tridimensionale il software di Google SketchUp. Lo scopo di tale applicativo è la costruzione del file di input dati da dare ad EnergyPlus, mediante i semplici ed intuitivi strumenti di disegno di SketchUp. Questo, oltre alla definizione del modello e del contesto, consente di impostare le proprietà principali delle zone termiche, come i profili di occupazione, i tassi di ventilazione, i carichi interni e le temperature di setpoint.

2. Simergy

Si presenta come un applicativo autonomo, con una propria interfaccia di modellazione geometrica. Se pur ad uno stato di sviluppo ancora preliminare, presenta un'interfaccia molto intuitiva nella modellazione dei sistemi impiantistici, consentendo di trascinare ed inserire blocchi e componenti in uno schema funzionale e di editarne le proprietà. Tuttavia mantiene il massimo livello di dettagli di input, senza porre filtri né fornire set di dati precompilati. Inoltre la gestione e la modellizzazione delle geometrie e delle proprietà termiche dei componenti d'involucro appare molto meno intuitiva e veloce rispetto al precedente applicativo. Nel corso degli anni è stata sviluppata anche una versione a pagamento con maggiori funzionalità per la

completa definizione del modello di simulazione, oltre ad un interfacciamento con il formato .ifc.

3. DesignBuilder

DesignBuilder è un software commerciale che presenta una propria interfaccia di modellazione grafica piuttosto intuitiva. Consente la definizione completa del modello di simulazione per il motore EnergyPlus, prevedendo anche la schematizzazione degli impianti a tutt'aria semplificati. Inoltre, presenta un'interfaccia per la visualizzazione dei risultati piuttosto intuitiva. Infine, esso presenta un proprio motore semplificato per la risoluzione dei problemi di fluidodinamica. Tuttavia è disponibile solo a pagamento.

2.2 INSERIMENTO DEL FILE METEO

Per poter effettuare la simulazione oltre al file che descrive l'edificio (in formato .idf) EnergyPlus necessita di un file meteo (in formato .epw) per poter modellare con maggior precisione le condizioni climatiche esterne. I principali dati contenuti in un file meteo riguardano i dati climatici che influenzano gli scambi termici quali la temperatura (°C), l'umidità relativa (%), la pressione atmosferica esterna (Pa), la radiazione solare globale orizzontale, normale e diffusa (W/m^2), la luminosità, la nuvolosità, la velocità del vento (m/s) ed altri fattori. Tutte queste grandezze fisiche vengono riportate nel file meteo per ogni ora del giorno e per ciascun giorno dell'anno per un totale di 8760 righe nel file. Diversi file meteo sono disponibili sul sito di EnergyPlus e sono in grado di fornire i dati climatici raccolti per oltre 2100 località nel mondo. In EnergyPlus c'è da inserire il parametro "Site:Location"

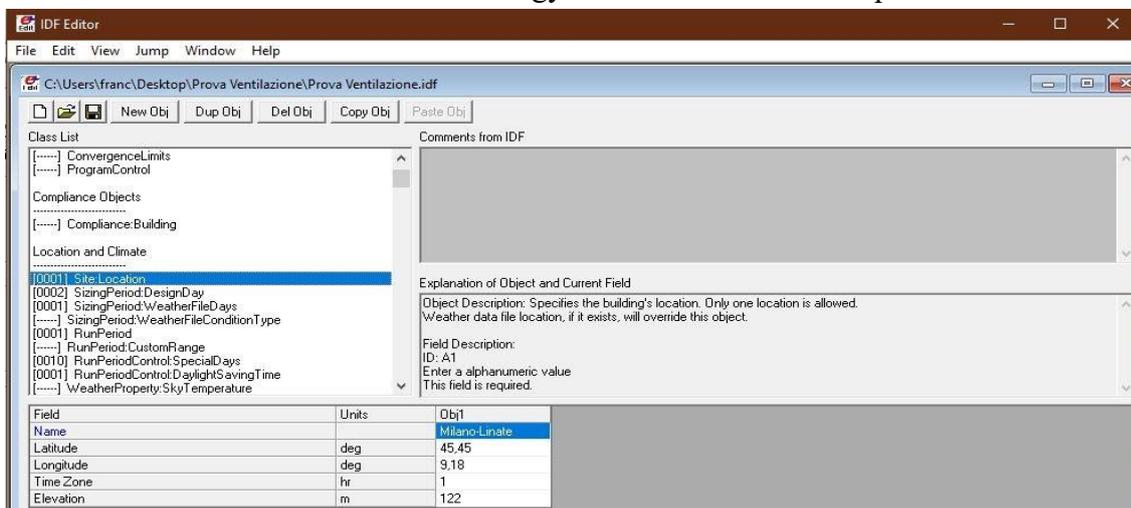


Figura 2. Interfaccia Inserimento Luogo

questo permette al programma di calcolare la posizione solare (utilizzando latitudine e longitudine) per ogni giorno dell'anno oltre che fornire la pressione barometrica standard (usando l'elevazione). I file meteo hanno dati orari o sub-orari per ciascuno degli elementi

critici necessari durante i calcoli (es. Temperatura a bulbo asciutto, Temperatura a bulbo umido, Umidità relativa, Pressione barometrica ecc.) oltre che alcuni dati ausiliari come la pioggia o la neve. Poi in “SizingPeriod:DesignDay” vengono descritti i giorni “tipo” di progetto settando alcune caratteristiche della giornata, EnergyPlus poi aggiunge i dati mancanti per completare le condizioni esterne necessarie al programma per la sua esecuzione. Per quanto riguarda l’input del giorno di progetto tipo, EnergyPlus prevede una temperatura a bulbo secco “superiore” e “inferiore”, tuttavia queste due temperature sono insufficienti per rappresentare l’andamento durante le ventiquattro ore, per questo il programma usa un moltiplicatore per descrivere l’andamento delle temperature durante tutto il giorno.

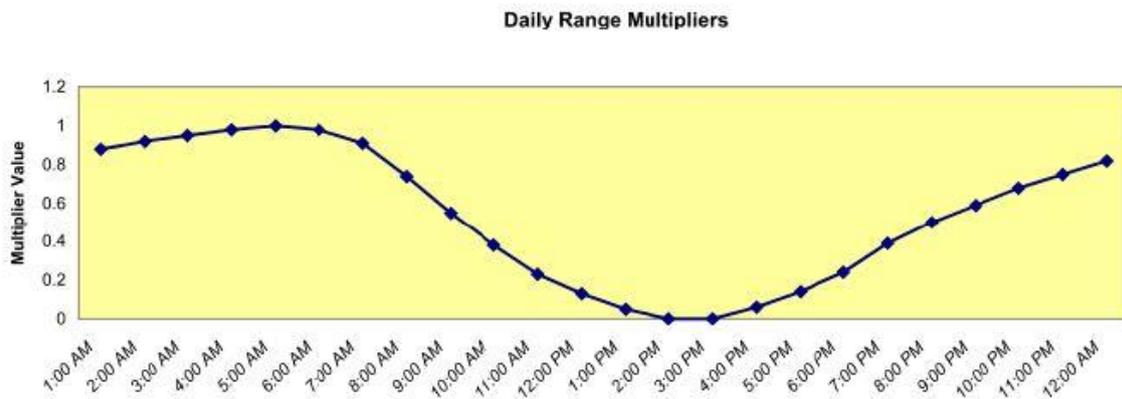


Figura 3. Andamento Orario Moltiplicatori EnergyPlus

Più nello specifico EnergyPlus crea una temperatura dell’aria per ciascun timestep utilizzando i valori inseriti di temperatura a bulbo asciutto “superiore” insieme ai valori inseriti dei range giornalieri e i moltiplicatori di sopra. L’equazione che viene utilizzata da EnergyPlus è:

$$T_{current} = T_{Max} - T_{range} \cdot T_{multiplier}$$

Dove:

$T_{current}$ = Temperatura dell’aria di quell’ora del giorno

T_{Max} = Temperatura a bulbo asciutto superiore inserita

T_{range} = Temperatura di range giornaliera inserita

$T_{multiplier}$ = Moltiplicatore

Una volta inserito il file meteo nel programma sono quindi stati inseriti i dati relativi alla simulazione, e quindi i dati che specificano il periodo dell’anno nel quale la simulazione ha luogo. Un parametro importante da stabilire per il corretto andamento delle simulazione è il timestep e cioè questo parametro indica il numero di volte in cui si vogliono raccogliere i dati;

cioè indicando un valore di timestep pari a 6 il programma effettuerà la simulazione ogni 10 minuti, mentre inserendo un valore di 60 otterremo una simulazione al minuto. La scelta fatta su questo parametro influenza anche l'accuratezza del modello ed il tempo complessivo necessario per portare a termine una simulazione. Questo ci fa capire come un valore più alto dia sicuramente una stima più precisa, tuttavia inserendo valori troppo alti se si ha un numero elevato di variabili ci potrebbe volere troppo tempo per completare la simulazione. In questo caso specifico sono poi state svolte più prove fino ad arrivare alla soluzione che il timestep più preciso e consono fosse quello orario e cioè pari a 1. Poi sono stati inseriti i dati relativi ai giorni di progetto. Infine però si è resa necessaria una modifica del file meteo perché le simulazioni con gli altri programmi sono state fatte tramite dei valori di temperature a bulbo asciutto e umido, umidità relativa, pressione atmosferica, radiazione globale, e diffusa ottenuti tramite la norma UNI 10349. Questa modifica del file meteo è stata ottenuta tramite il programma Elements



Figura 4. Interfaccia Grafica Elements

Questo programma permette sia di aprire un file meteo per modificarne i dati, sia di crearne uno nuovo. Quello che ho fatto è stato aprire il file meteo scaricato originariamente dalla banca dati di EnergyPlus e poi modificarne i valori di temperatura a bulbo secco e bulbo umido, umidità relativa, pressione atmosferica, velocità del vento, radiazione globale e radiazione diffusa inserendo i valori che mi sono stati forniti, per la radiazione normale è bastato inserire prima le radiazioni globale e diffusa e poi il programma l'ha calcolata utilizzando il suo algoritmo di calcolo.

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]	Wet Bulb Temperature [C]	Atmospheric Pressure [kPa]	Relative Humidity %	Dew Point Temperature [C]	Global Solar [Wh/m2]	Normal Solar [Wh/m2]	Diffuse Solar [Wh/m2]	Wind Speed [m/s]
2005/01/01 @ 00:00:00	6.9	6.6	100.09	96	6.33	0	0	0	1.9
2005/01/01 @ 01:00:00	6.2	5.91	100.09	96	5.63	0	0	0	2.3
2005/01/01 @ 02:00:00	5.9	5.61	100.09	96	5.33	0	0	0	2.5
2005/01/01 @ 03:00:00	5.8	5.51	100.09	96	5.23	0	0	0	1.7
2005/01/01 @ 04:00:00	4.9	4.62	100.09	96	4.33	0	0	0	2.1
2005/01/01 @ 05:00:00	4.5	4.23	100.09	96	3.93	0	0	0	1.9
2005/01/01 @ 06:00:00	3.9	3.63	100.09	96	3.33	0	0	0	2
2005/01/01 @ 07:00:00	4	3.73	100.09	96	3.43	1	0	1	2
2005/01/01 @ 08:00:00	4	3.73	100.09	96	3.43	9.1	2	9	1.9

Figura 5. Presentazione del File Meteo

2.3 PRIMO CONFRONTO

A questo punto si è reso necessario svolgere un primo confronto dei dati, cioè il confronto dei dati climatici ottenuti da EnergyPlus e quelli di TRNSYS e della norma UNI 10349. Per farlo come prima cosa è stato creato un edificio semplice tramite il software Google SketchUp.

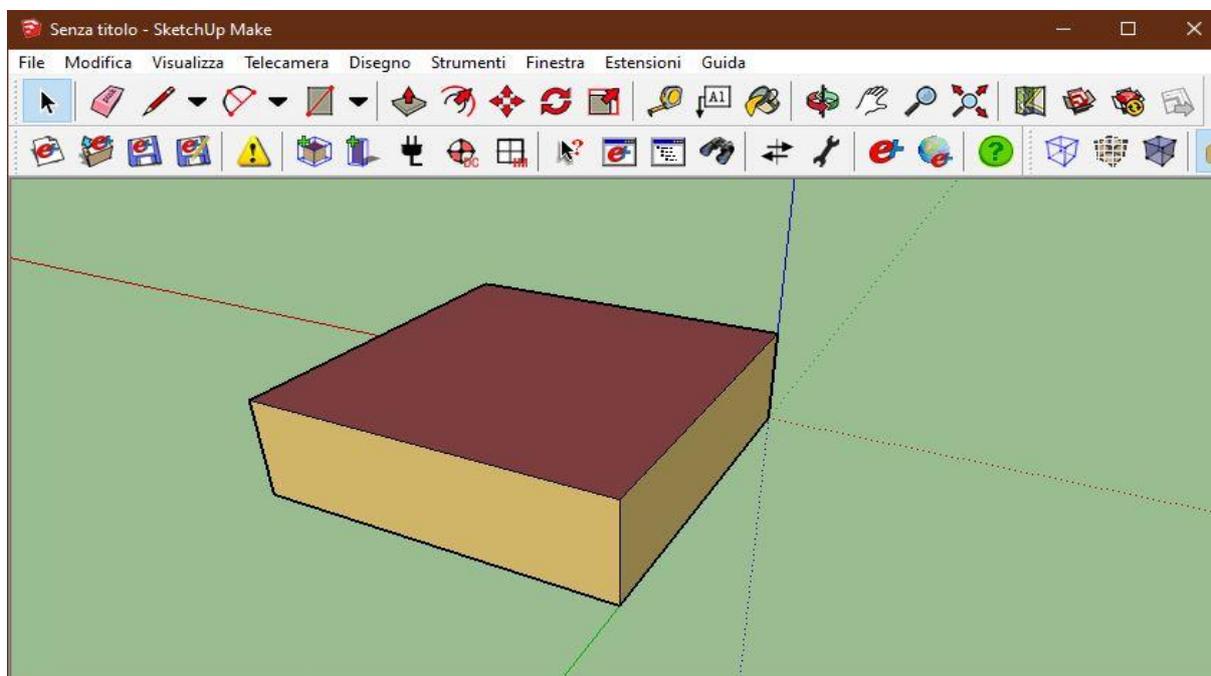


Figura 6. Primo Modello di Confronto

Poi è stato salvato il file come formato .idf e cioè il formato letto da EnergyPlus, a questo punto si è reso necessario andare a cercare tra le variabili di EnergyPlus quelle relative ai dati climatici di interesse.

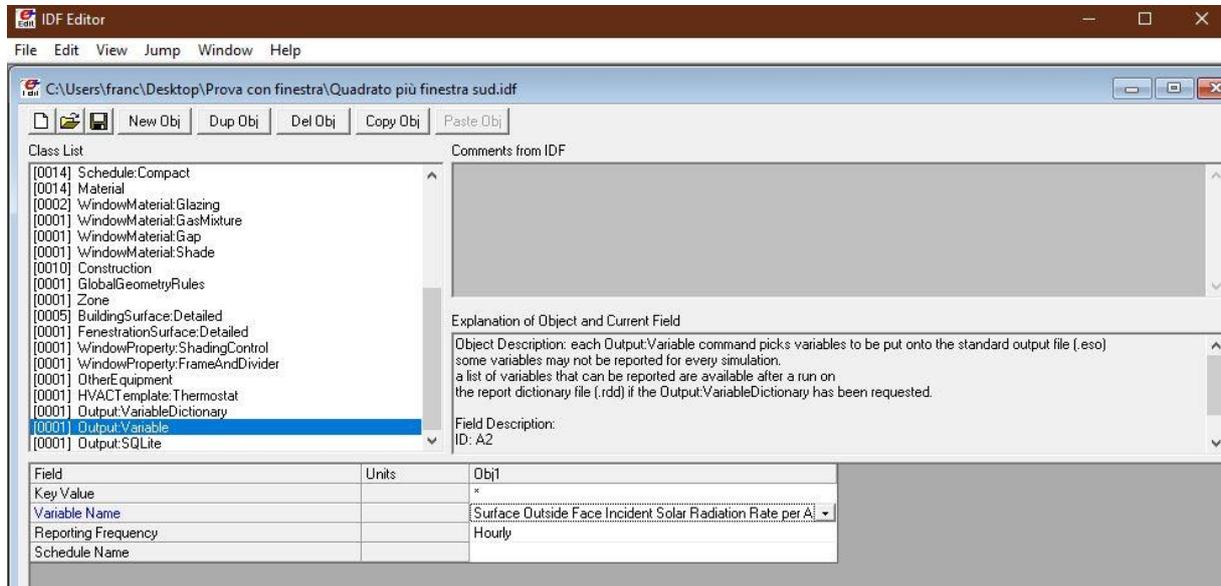


Figura 7. Scelta della Variabile di Output

Questa variabile fornisce la radiazione globale incidente su ciascun orientamento in W/m^2 . A questo punto si procede con la simulazione e questo porterà ad avere un file formato .csv, questo file (cartella a valori separati) dovrà essere aperto con Excel e una volta convertito in file Excel darà i valori delle variabili che di interesse. Una volta trovate le variabili si passa a graficizzarle insieme a quelle degli altri programmi per avere il confronto relativo ai dati climatici, questo confronto ha messo in evidenza dei problemi dovuti al fatto che l'input del file meteo di elements viene dato dall'ora 00:00 all'ora 23:00, mentre l'output di EnergyPlus viene fornito dall'ora 01:00 all'ora 24:00 e questo causava uno sfasamento dei dati di un'ora. Il problema è stato risolto andando ad inserire i dati in elements anticipati di un'ora, così da avere i valori giusti. Infine i confronti tra i vari programmi hanno portato come risultato i seguenti grafici:

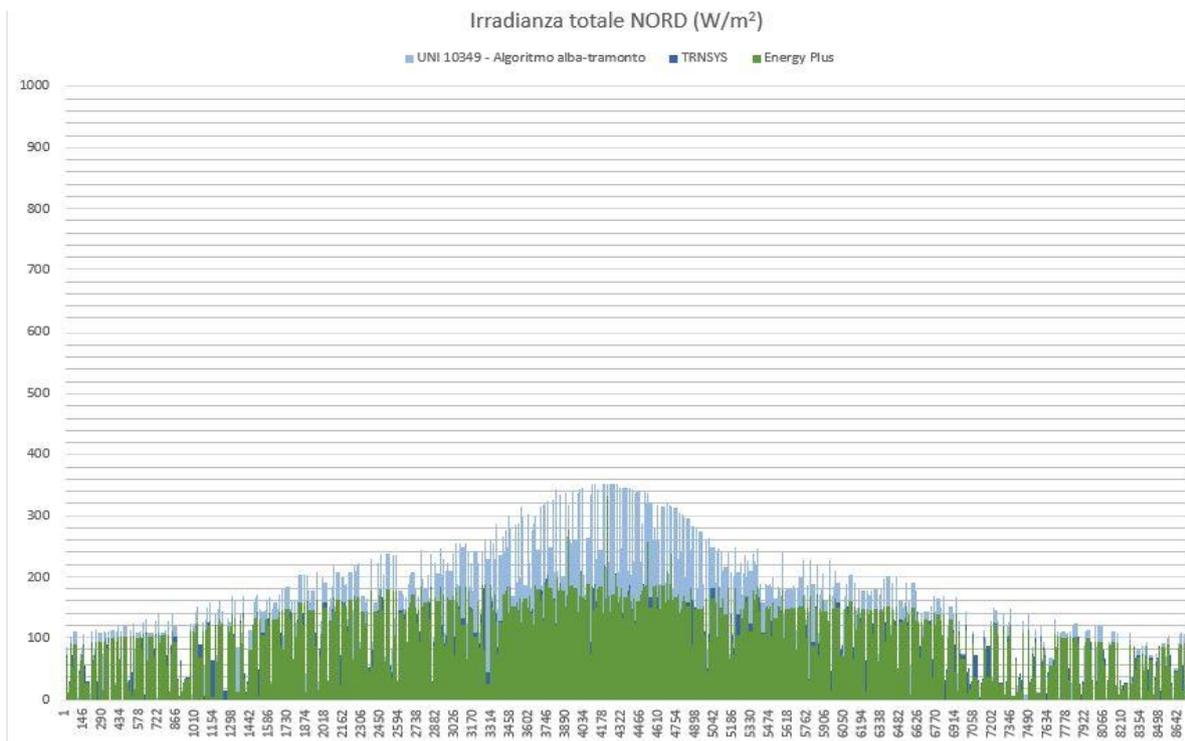


Figura 8. Grafico di Confronto della Radiazione Incidente a Nord

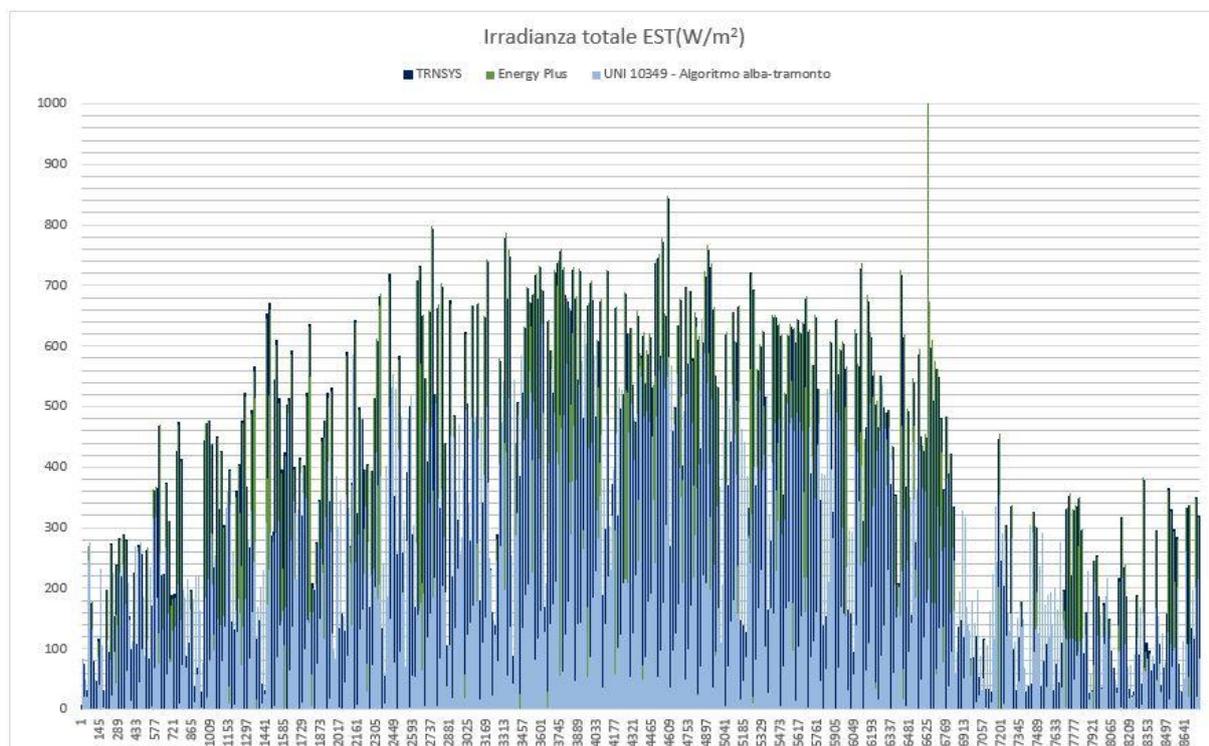


Figura 9. Grafico di Confronto della Radiazione Incidente ad Est

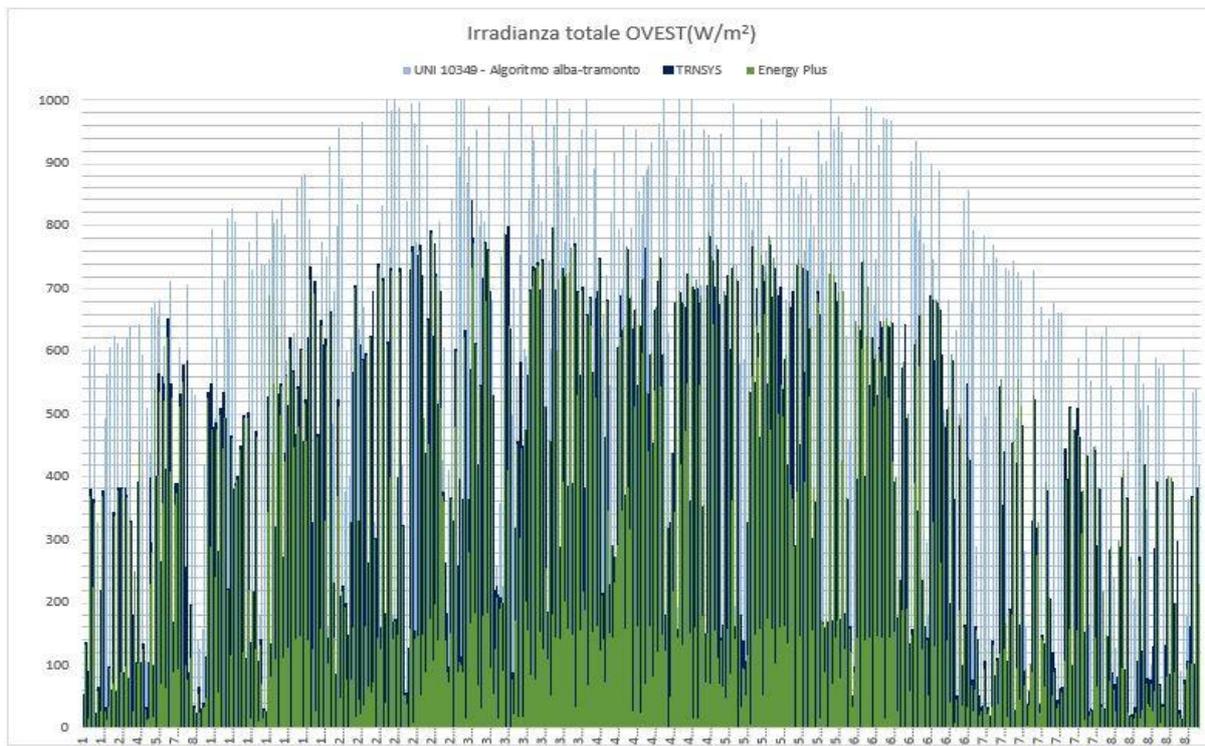


Figura 10. Confronto Grafico della Radiazione Incidente ad Ovest

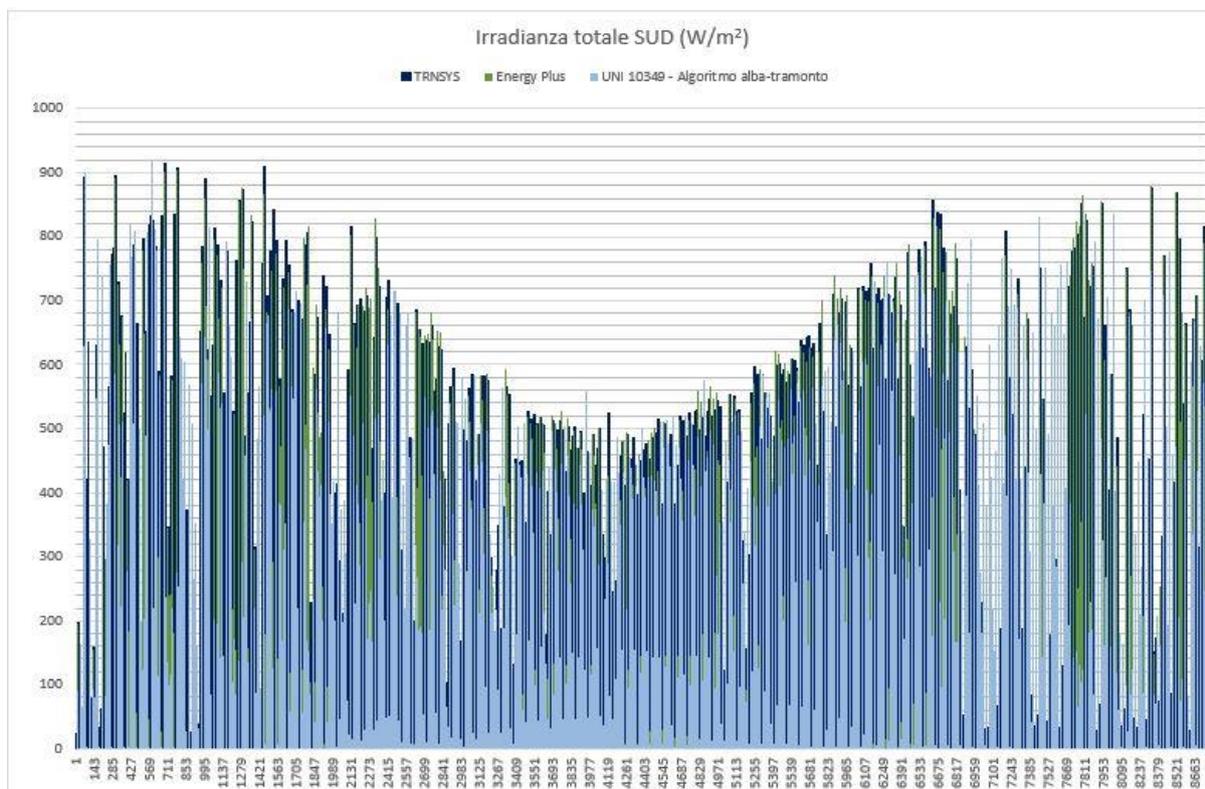


Figura 11. Confronto Grafici Radiazione Incidente a Sud

Come si evince dai grafici a sud troviamo un comportamento praticamente allineato per tutti gli algoritmi di calcolo, ad est abbiamo un andamento comunque accettabile anche se l'algoritmo della norma UNI 10349 rimane di poco più basso, mentre negli altri orientamenti possiamo notare come EnergyPlus e TRNSYS rimangano sempre molto vicini (dato che sfruttano lo stesso algoritmo di calcolo) mentre i calcoli svolti con l'algoritmo della norma UNI 10349 rimangono sempre più alti rispetto a quelli degli altri due programmi.

3. CREAZIONE DELL'EDIFICIO DI STUDIO

3.1 INSERIMENTO DEI MATERIALI PER LE STRUTTURE OPACHE

Una volta allineati i dati climatici siamo certi che i parametri di input (almeno per quanto riguarda le condizioni dell'ambiente esterno) siano gli stessi, a questo punto viene realizzato l'edificio del caso di studio sempre utilizzando Google SketchUp (file che poi viene salvato in .idf dal plug-in di EnergyPlus installato in SketchUp).



Figura 12. Realizzazione del Modello

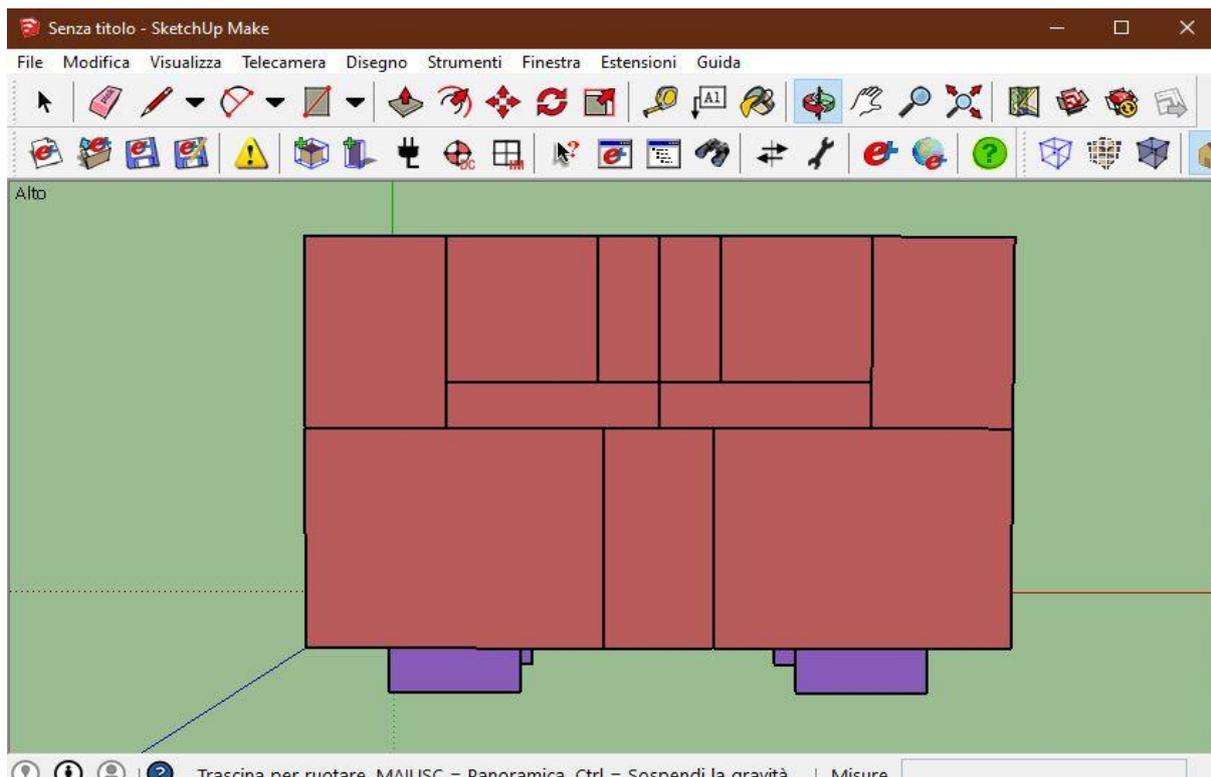


Figura 13. Pianta degli Appartamenti

L'edificio è di 3 piani, per ogni piano ci sono 2 appartamenti simmetrici che si compongono di un soggiorno (sulla facciata sud) 2 camere da letto, un bagno ed un corridoio, in più i due appartamenti sono separati dal vano scala. Nella realizzazione dell'edificio per ciascun vano viene creata una zona termica così da gestire singolarmente ciascun vano. Una volta finita la realizzazione grafica del modello questo è stato salvato in formato .idf e inserito in EnergyPlus, a questo punto è stato necessario l'inserimento dei materiali di cui si compone l'edificio.

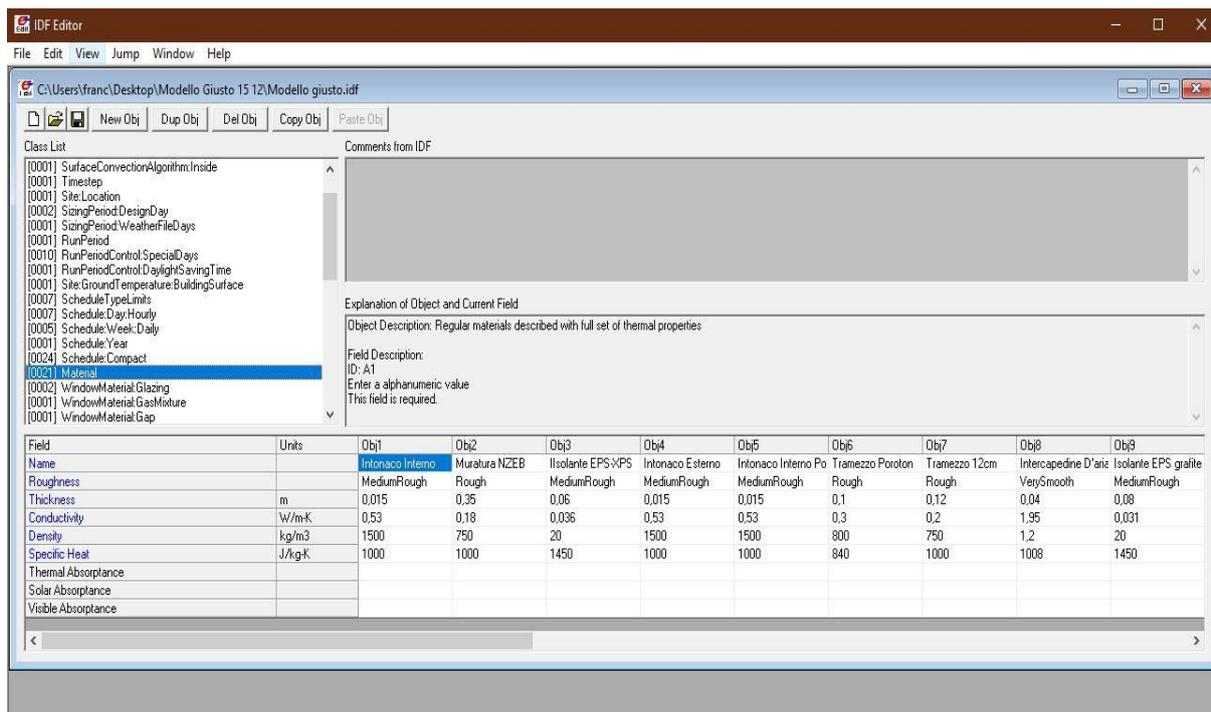


Figura 14. Interfaccia Inserimento Materiali

L'inserimento degli elementi delle strutture in EnergyPlus avviene tramite l'inserimento delle proprietà termiche di base e di altre proprietà delle costruzioni. I materiali vengono specificati per tipo e per nome, le costruzioni vengono poi definite tramite la composizione dei materiali e le superfici vengono individuate tramite coordinate specifiche di riferimento. I materiali vengono inseriti in EnergyPlus inserendo il nome, la rugosità, lo spessore (in metri), la conducibilità (in $W/m \cdot K$), la densità (in Kg/m^3), ed il calore specifico (in $J/Kg \cdot K$). Gli strati estremamente sottili o estremamente conduttivi vengono trascurati piuttosto che inclusi perché non contribuiscono alla resistenza termica totale o alla capacità termica.

3.2 INSERIMENTO MATERIALI FINESTRE

Una volta inseriti i materiali relativi alle strutture opache vanno inseriti i materiali che comporranno le finestre. Nel caso di studio sono stati utilizzati i dati che erano già stati forniti in precedenza tramite il programma WINDOW e inseriti all'interno di EnergyPlus.

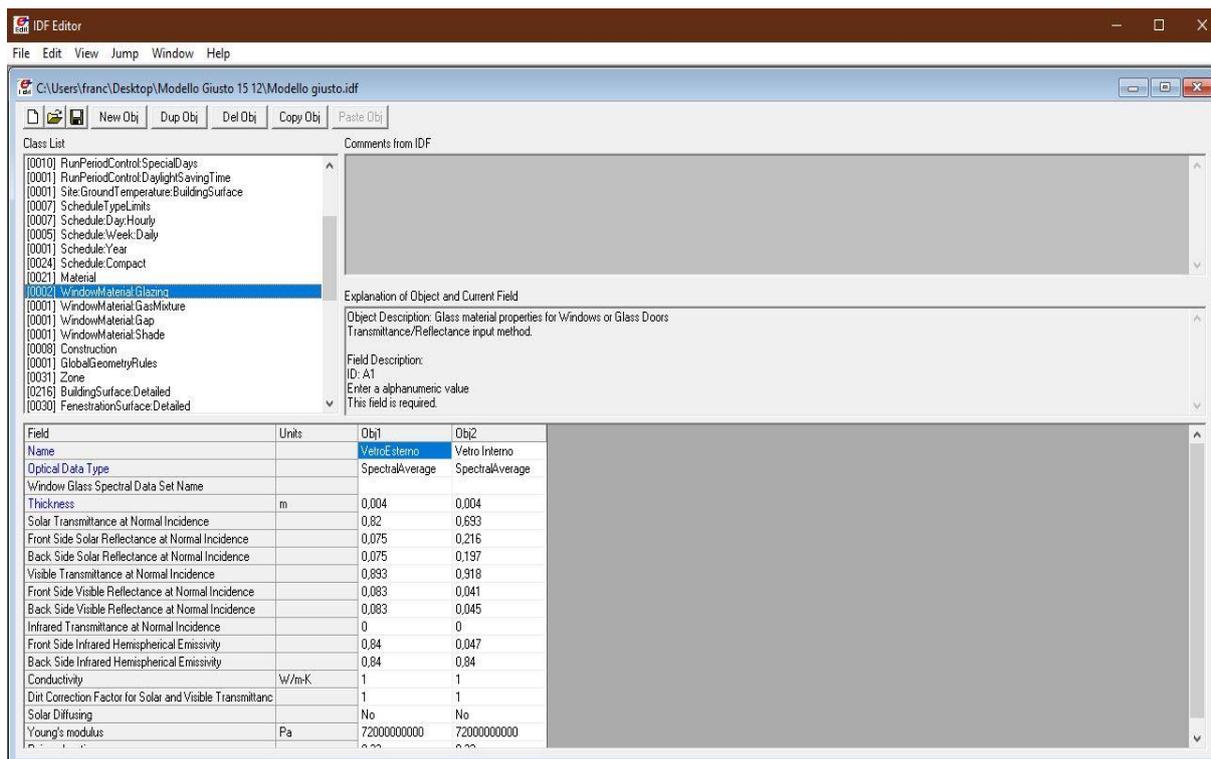


Figura 15. Interfaccia Inserimento Materiali Finestre

I materiali definiti in questo modo, vengono applicati sia per le finestre che per le porte vetrate. Una volta inseriti i materiali questi dovranno essere applicati alla costruzione della finestra. EnergyPlus indica come “Front Side” il lato opposto alla zona nella quale la finestra è definita, mentre “Back Side” è il lato più vicino alla zona nella quale la finestra è definita. La radiazione solare che viene trasmessa dagli strati delle finestre e che entra nella zona è una componente del carico di zona. La radiazione solare assorbita da ciascuno strato solido (vetro, persiana, zanzariera ecc.) partecipa al bilancio termico della finestra. Le proprietà di trasmittanza visibile e riflettanza della finestra vengono utilizzate nel calcolo dell’illuminazione diurna. Il campo che è stato compilato per l’inserimento dei materiali della finestra è quello di “WindowMaterial:Glazing”, questo oggetto permette di inserire tutti i parametri che vanno a caratterizzare il vetro. Sono stati creati due tipi di vetro, uno esterno ed uno interno dato che abbiamo doppi vetri con interposto al loro interno un mix di gas e il vetro interno è caratterizzato da un “front side” basso emissivo. Questo oggetto richiede l’inserimento dell’optical data type, che per tutti e due i vetri è stato scelto come SpectralAverage e cioè i valori inseriti per la trasmittanza solare e la riflettanza vengono mediati su tutto lo spettro solare, mentre i valori di trasmittanza e riflettanza della parte visibile vengono mediati su tutto lo spettro solare e pesati in base alla risposta dell’occhio umano. Poi sono stati inseriti i valori di spessore (m), trasmittanza solare ad incidenza normale, riflettanza solare ad incidenza normale per il lato “Front” e “Back”, la trasmittanza visibile ad incidenza normale, la riflettanza visibile ad incidenza normale del lato “Front” e “Back” e l’emissività dei lati “Front” e “Back”. Una volta

definite le proprietà dei vetri interno ed esterno si passa a definire il mix di gas incluso tra i due vetri, in questo caso abbiamo un mix di gas costituito al 90% da Argon ed al 10% da aria. Questo gas è stato inserito mediante l'oggetto WindowMaterial:GasMixture

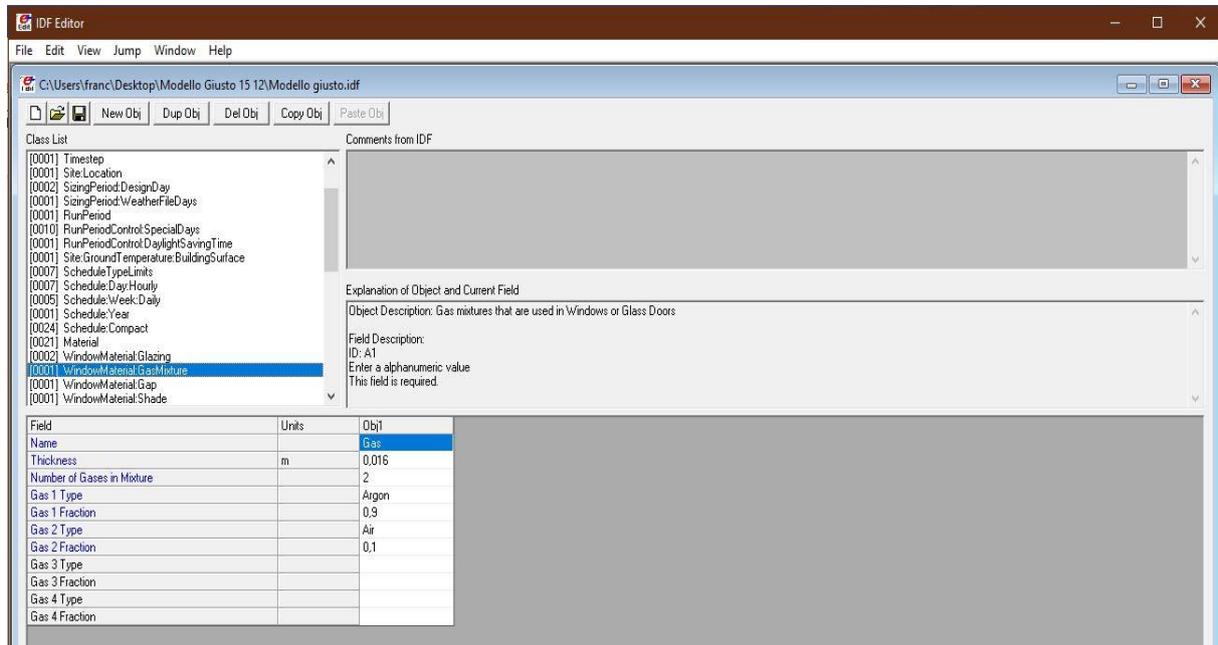


Figura 16. Inserimento Gas del Doppio Vetro

Questo tipo di oggetto permette di scegliere se i vetri della finestra siano riempiti con 2,3 o 4 gas diversi a scelta tra Aria, Argon, Krypton e Xenon. Si può anche utilizzare un solo gas, ma in questo caso dovrà essere utilizzato un oggetto diverso e cioè “WindowMaterial:Gas”. In questo oggetto andremo quindi ad inserire lo spessore della miscela di gas che inseriamo tra i vetri, il numero di gas che la compongono e il tipo e la percentuale di gas inseriti all'interno della camera. Infine tramite l'oggetto “WindowMaterial:Gap” si inserisce lo spessore del mix di gas, andando a richiamare il gas creato in precedenza

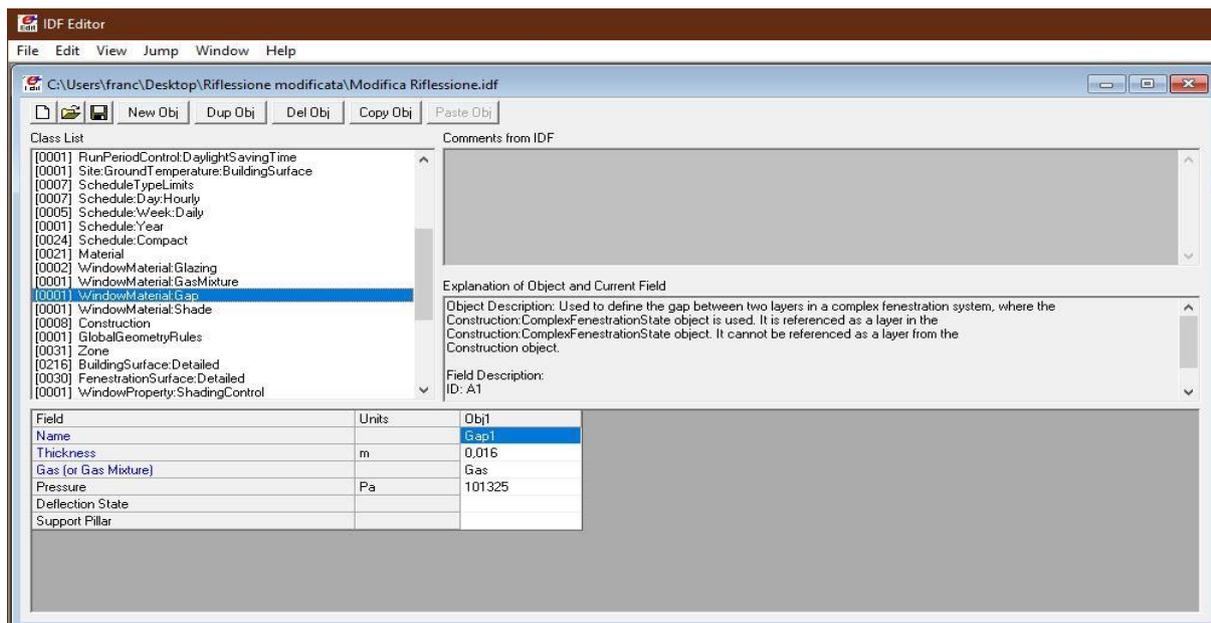


Figura 17. Inserimento Spessore dello Strato di Gas

Per concludere i dati relativi all'inserimento della finestra bisogna inserire le schermature. Schermature che possono essere interne o esterne, il programma ci consente di scegliere tra persiane, tende (interne, esterne o interne alla camera d'aria) e zanzariere. In questo caso abbiamo delle semplici tende interne, per questo l'oggetto che è stato scelto per il loro inserimento è "WindowMaterial:Shade".

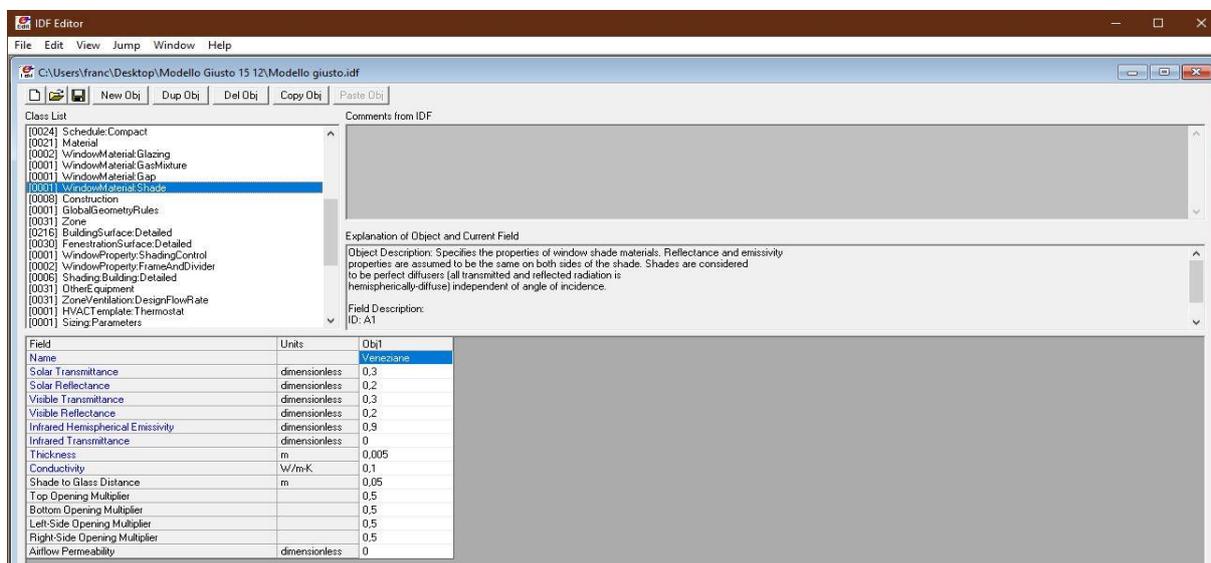


Figura 18. Inserimento delle Schermature

In questo oggetto i dispositivi di ombreggiamento vengono considerati come diffusori perfetti (tutta la radiazione trasmessa e riflessa viene considerata come diffusa emisfericamente) con trasmittanza e riflettanza indipendenti dall'angolo di incidenza. I dispositivi di ombreggiamento

possono essere interni alla finestra (interior shade), esterni alla finestra (exterior shade) oppure tra i vetri della finestra (between-glass shade). Quando è in funzione si considera che il dispositivo di ombreggiamento copra tutta la parte vetrata della finestra, includendo i divisori ma non il telaio (se questo è presente). I dispositivi di ombreggiamento necessitano di un controllo, controllo che viene impostato dall'oggetto "WindowPropriety:ShadingControl"

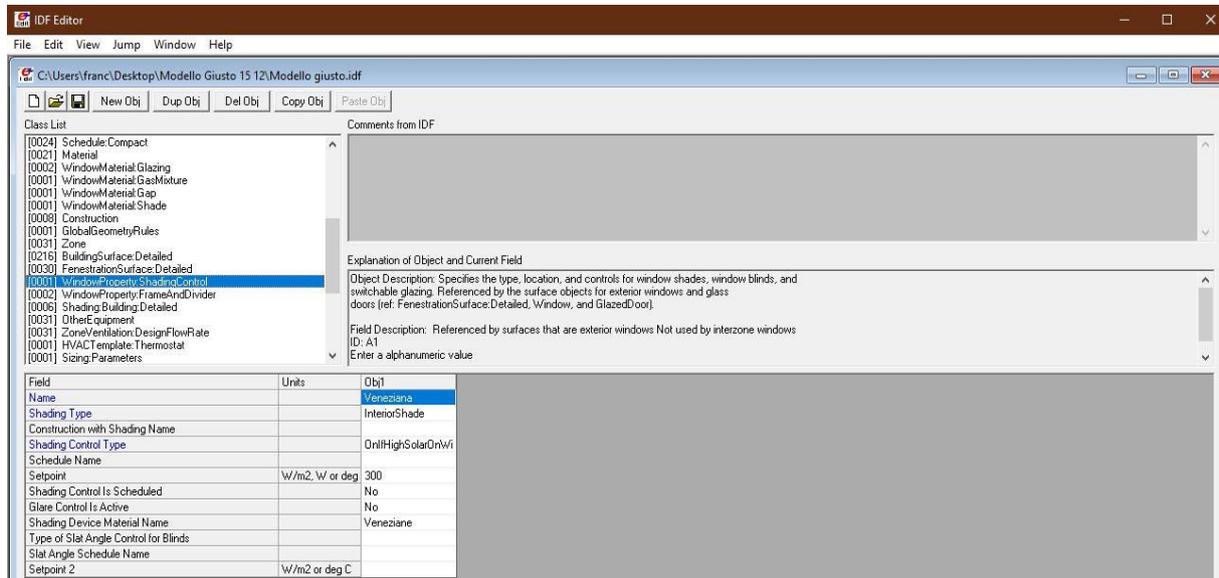


Figura 19. Inserimento del Controllo delle Schermature

Lo shading control ci permette di stabilire intanto se il dispositivo di ombreggiamento sia interno, esterno, o in mezzo agli strati di vetro oltre che la percentuale di luce che il dispositivo di shading permette di schermare.

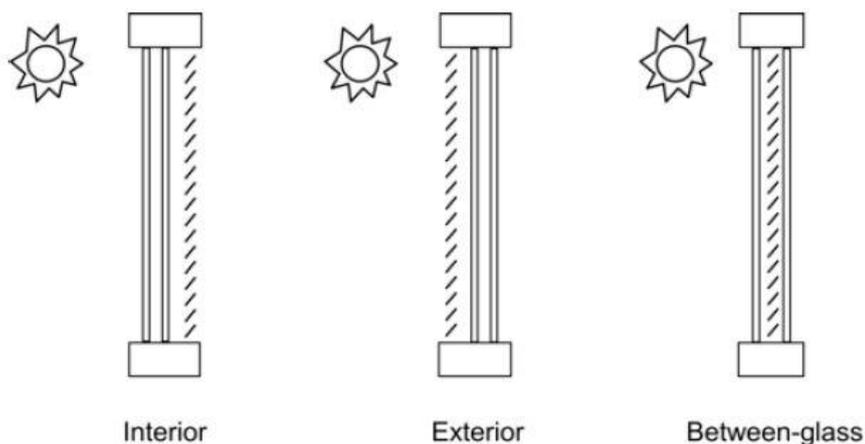


Figura 20. Tipi di schermature

I dispositivi di shading vengono quindi utilizzati sia per ridurre il quantitativo di radiazione solare entrante dalla finestra, sia di ridurre le perdite di calore attraverso essa. Lasciando aperta la schermatura della finestra in inverno possiamo massimizzare i guadagni solari di calore riducendo, così, le perdite. Inoltre ci permette di impostare un controllo relativo all'azionamento dello shading. La norma impone che lo shading si azioni quando la radiazione solare incidente sulla finestra è maggiore di 300 W/m^2 . Un'errata impostazione dello shading porta ad avere dei carichi solari e di conseguenza dei fabbisogni energetici della zona termica estremamente differenti. I sistemi schermanti hanno un notevole peso sul bilancio termico di zona, soprattutto nel periodo estivo in quanto riescono a limitare la radiazione solare entrante. Avere un apporto solare più basso in estate, dove la radiazione solare raggiunge anche i 1000 W/m^2 , porta ad avere una temperatura dell'aria interna più vicina a quella di setpoint e quindi ad un minor fabbisogno energetico. Ci sono poi due metodi per definire il sistema di ombreggiamento, quello scelto da questa tesi riguarda lo "Specificare il materiale del sistema di ombreggiamento". Questo metodo consiste nel creare uno shading in "WindowMaterial:Shade" e quello verrà poi immediatamente applicato dal programma in quanto viene richiamato in "WindowMaterial:ShadingControl" e questo permette di non dover richiamare lo shading anche nella sezione "Construction". L'ultima parte relativa all'ombreggiamento delle finestre viene impostata tramite l'oggetto "ShadingBuilding:Detailed" questo oggetto permette di inserire il contributo all'ombreggiamento dovuto ad oggetti e dispositivi di ombreggiamento fissi.

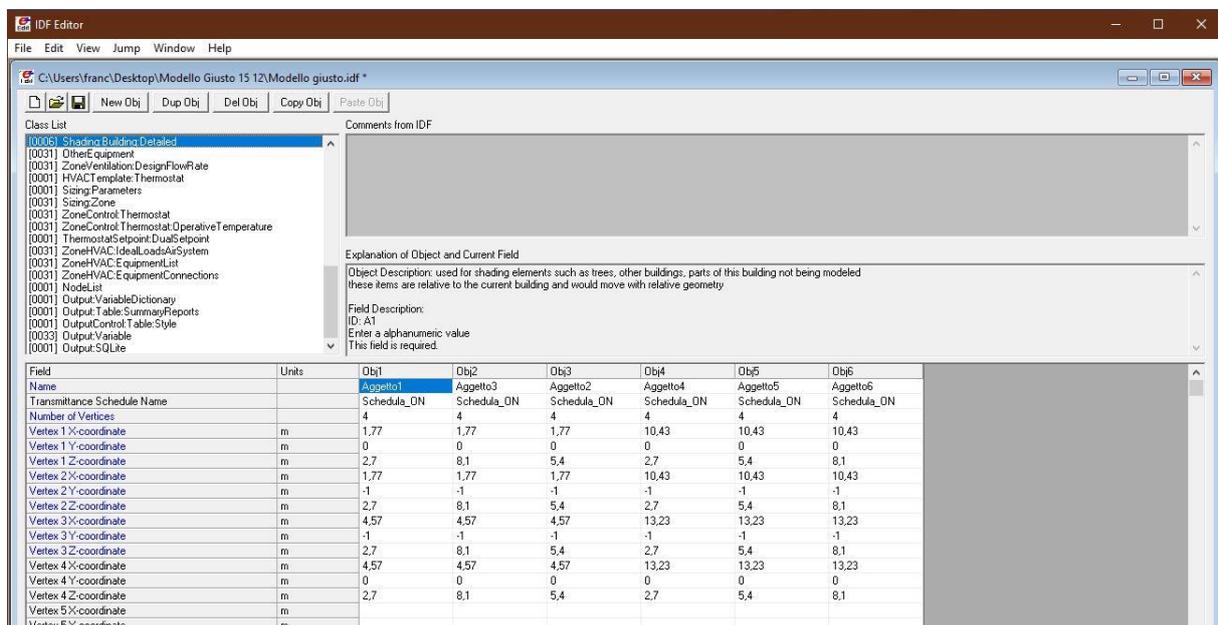


Figura 21. Inserimento Shading degli Aggetti

Gli aggetti sono stati già definiti nella costruzione del modulo con SketchUp, in questo oggetto la cosa interessante è il poter andare a definire delle schedule che permettono di dare degli orari e dei giorni di funzionamento a questi dispositivi di shading. In questo caso lo shading è

costituito da balconi di conseguenza sono oggetti fissi che rimangono sempre attivi, per questo ci possiamo limitare a imporre una schedule che li faccia considerare al programma sempre attivi. Infine l'ultimo parametro da inserire per il completamento dell'inserimento delle finestre è quello dell'inserimento di telaio e divisore, dall'oggetto "WindowPropriety:FrameAndDivider"

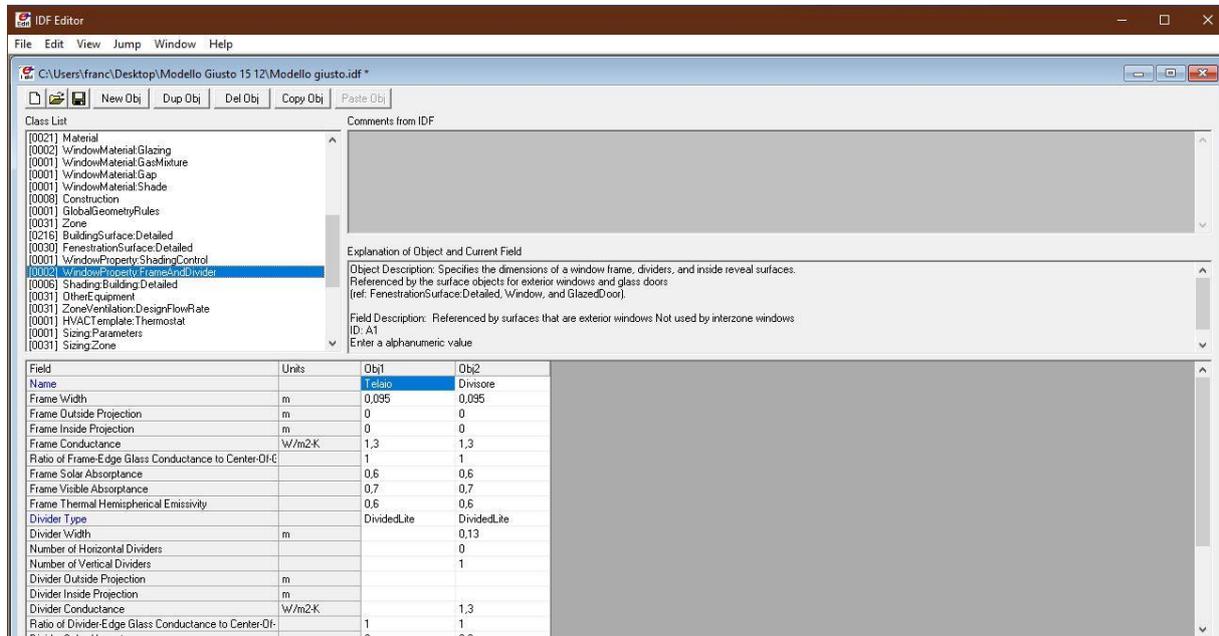


Figura 22. Inserimento di Telaio e Divisore

In questo oggetto vengono richieste le dimensioni del telaio e i vari parametri relativi alle sue caratteristiche termiche, questo servirà per i calcoli dell'energia trasmessa e assorbita dalla finestra e per altri calcoli svolti dal programma.

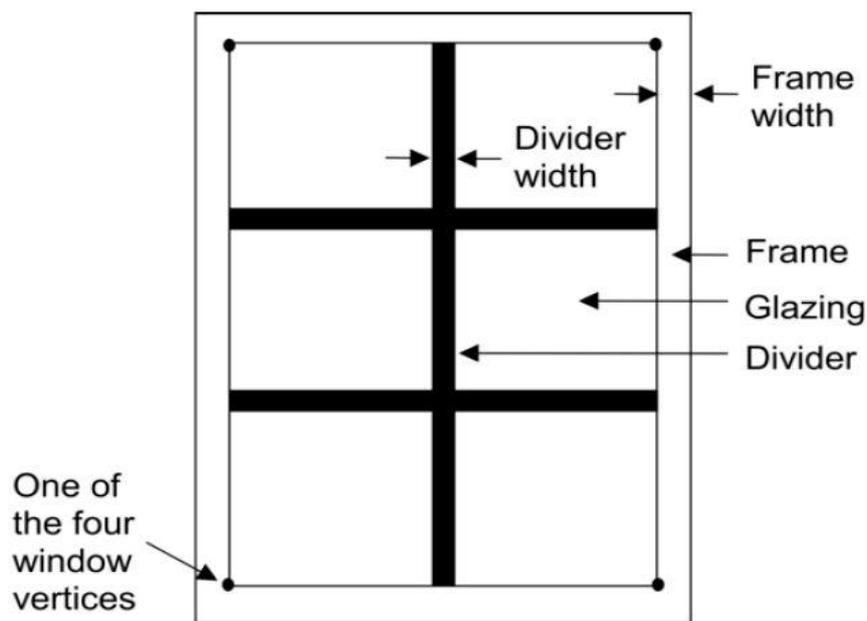


Figura 23. Elementi della Finestra EnergyPlus

3.3 MODELLO DI CALCOLO DELLE FINESTRE DI ENERGYPLUS

Per il calcolo delle finestre EnergyPlus può usare 2 approcci, il primo (e cioè quello che è implementato e che viene utilizzato in questa tesi) oppure il modello semplificato (che per essere utilizzato correttamente necessita che vengano verificate alcune situazioni particolari). Il calcolo primario delle finestre si basa su un modello di calcolo strato per strato, dove le finestre sono considerate come composte da una serie di componenti dei quali solo il primo è necessario che sia presente:

- **Glazing:** che consiste in uno o più strati di vetro, se dovessero esserci più strati questi saranno separati di un'intercapedine riempita con del gas. I calcoli delle finestre che effettua il programma sono basati su quelli del programma WINDOW dal quale sono stati presi i dati inseriti per i vetri delle finestre
- **Gap:** strati riempiti con aria o altri gas che separano gli strati di vetro
- **Frame:** il telaio che circonda il vetro dai quattro lati
- **Divider:** cioè gli elementi orizzontali o verticali che dividono il vetro della finestra
- **Shading Device:** che rappresenta uno strato separato come ad esempio una tenda, una persiana o una zanzariera all'interno o all'esterno del vetro, il cui scopo è quello di

ridurre gli apporti solari, ridurre la perdita di calore, e controllare l'apporto di luce diurna.

3.4 APPLICAZIONE DEI MATERIALI

Una volta che tutti i materiali sono stati inseriti e che sono state definite le stratigrafie e le proprietà delle finestre, questi materiali vanno applicati agli elementi dell'edificio (muri, solai, finestre ecc.).

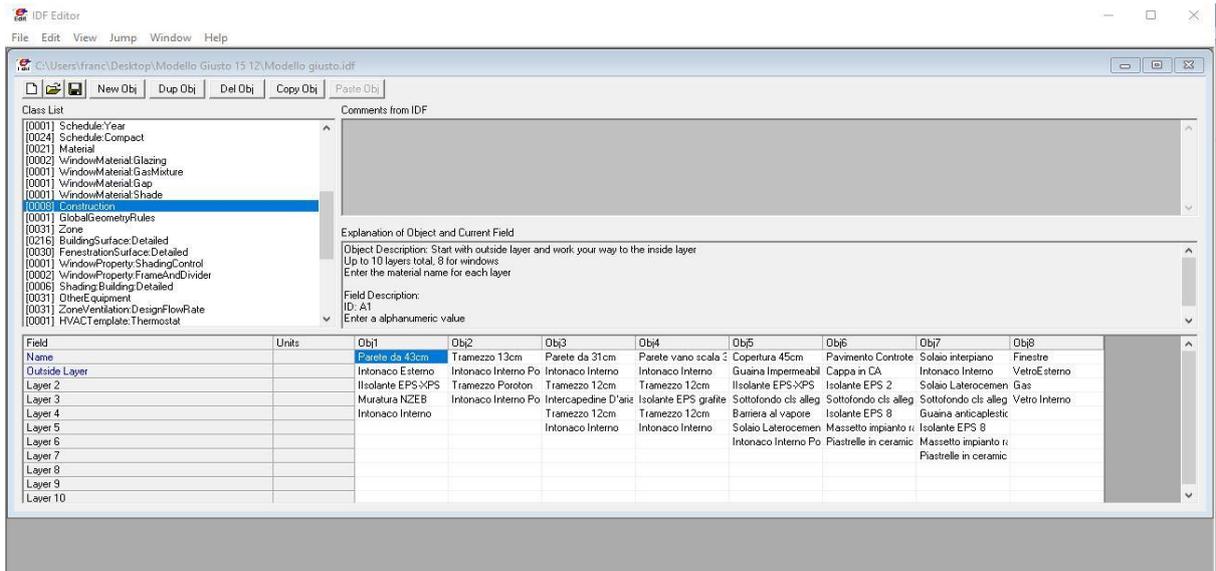


Figura 24. Inserimento della Costruzione degli Elementi

In EnergyPlus ogni strato della costruzione viene messo in lista dal più esterno al più interno, e possono essere specificati fino a 10 strati. Lo strato più esterno lo intendiamo come lo strato a contatto con l'aria esterna, mentre quello più interno lo consideriamo come quello più a contatto con l'aria di zona. Una costruzione simile avviene anche per le finestre

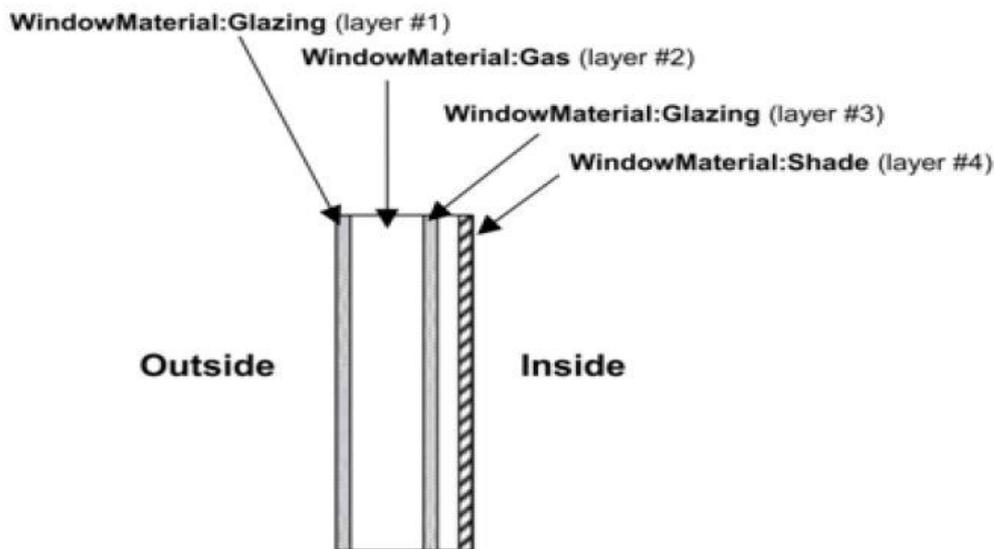


Figura 25. Strati della Finestra

Nelle quali però non si tiene conto del gap tra vetro interno e shading interno. Quindi una volta inseriti tutti i materiali basterà richiamarli, facendo attenzione a seguire l'ordine giusto di costruzione, all'interno dell'oggetto "Construction", ricordandosi anche del fatto che i materiali uguali ma con spessori diversi sono stati inseriti 2 volte, quindi per ogni strato bisogna selezionare il giusto materiale a cui ci si sta riferendo se non si vogliono ottenere risultati sbagliati. Una volta inseriti i tipi di costruzione questi sono stati applicati ai vari elementi tramite l'oggetto "BuildingSurface:Detailed"

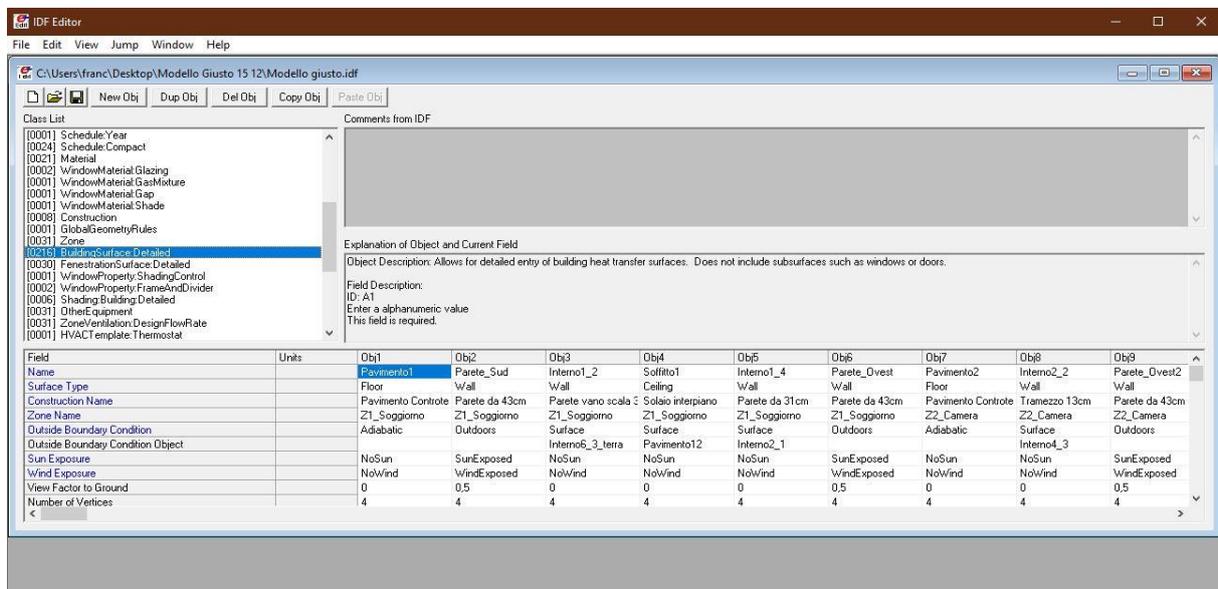


Figura 26. Assegnazione delle Costruzioni degli Elementi Costruttivi

In questo oggetto ad ogni singolo elemento di ciascuna zona termica viene applicato il materiale che la compone. Oltre al materiale bisogna porre attenzione anche alle “Outside Boundary Conditions”, questo oggetto ci permette di scegliere tra varie voci, e tra tutte quelle disponibili, quelle usate in questa tesi sono:

- **Surface:** questa voce viene selezionata quando parliamo di un elemento che appartiene all'interno di una zona, quindi ad esempio le pareti divisorie.
- **Outdoors:** questa voce viene utilizzata quando parliamo di pareti esterne e quindi viene poi abbinata alle voci SunExposed e WindExposed, essendo che le pareti esterne sono esposte al vento e alla radiazione solare
- **Adiabatic:** questa voce viene utilizzata per una superficie interna in una stessa zona, perché questa non trasferirà calore fuori dalla zona, ma si limiterà ad immagazzinarlo. In questo caso però ho usato questa voce abbinata ai pavimenti del piano a terra, questo perché la valutazione dello scambio termico con il terreno è molto complessa e di conseguenza avrebbe portato a sballare i valori forniti dal programma, per questo è stato reputato opportuno considerare i pavimenti a contatto con il terreno come adiabatici.

La voce “Surface” viene utilizzata per indicare pareti o solai che dividono due zone termiche. In questo caso però, essendo che con SketchUp bisogna disegnare le stanze zona termica per zona termica, avremo delle sovrapposizioni tra pareti e tra solai delle zone adiacenti. Per questo tutti gli elementi contraddistinti dalla voce surface sono stati abbinati a quelli a loro adiacenti tramite la voce “Outside Boundary Condition Object”, come si può vedere ciascun elemento che divide una zona termica è associato all'elemento divisorio della zona termica adiacente, questo permette lo scambio di calore tra le zone quando vengono simulati (come in questo caso) sistemi multizona. Infine il View Factor To Ground rappresenta la frazione di terreno visibile da una superficie di scambio termico e viene utilizzato per la calcolare la radiazione diffusa dal terreno sulla superficie, ed è stato impostato a 0,5; ovviamente il valore viene utilizzato solo nelle pareti esterne.

Una volta definite le superfici opache vanno definite le finestre tramite l'oggetto “FenestrationSurface:Detailed”

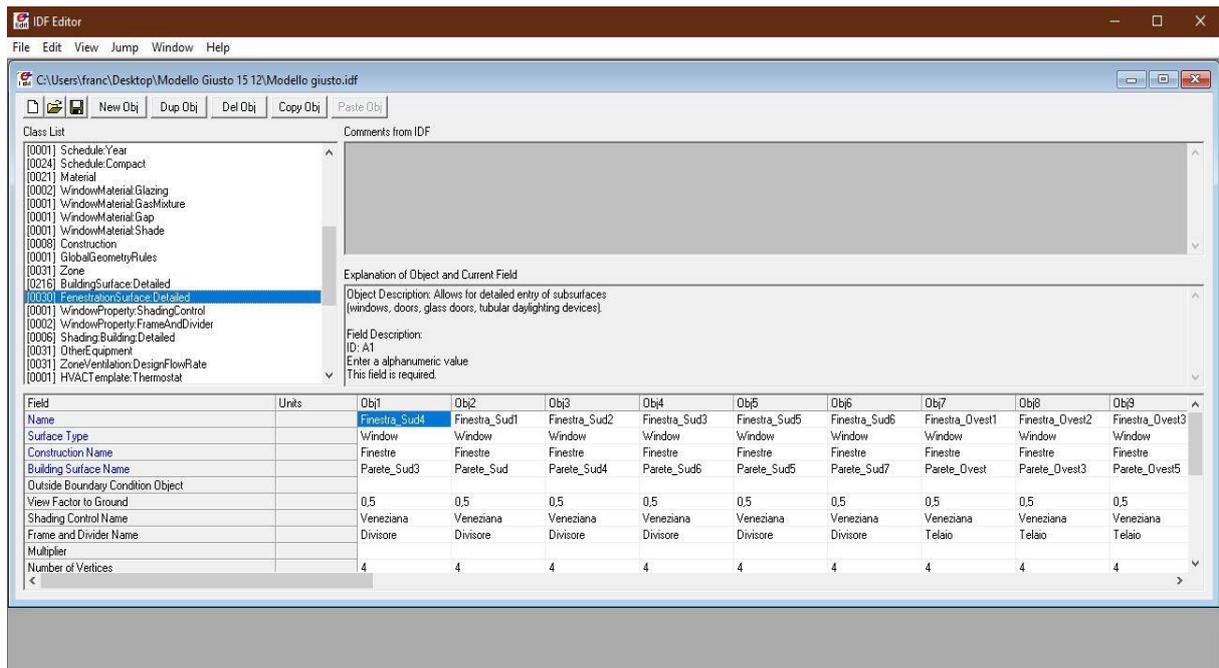


Figura 27. Assegnazione dei Dettagli alle Finestre

Questa classe viene utilizzata per finestre, porte, porte vetrate, cupole di luce diurna tubolari, e diffusori tubolari di luce diurna. Una sottosuperficie (come può essere una finestra) eredita alcune delle proprietà della superficie cui è associata (ad esempio di un muro questa eredita le condizioni al contorno, l'esposizione solare ecc.). Tutte queste superfici possono essere realizzate in strati vetrati per questo vengono considerate come superfici che trasmettono la radiazione solare, tutte tranne le porte che vengono considerate come superfici opache. Avendo già definito il tipo di vetro di cui la finestra è composta ed avendo già creato la stratigrafia della finestra in questo oggetto non ci resta che andare a richiamare la stratigrafia per ogni singola finestra e selezionare con che tipo di elemento abbiamo a che fare (tra quelli elencati sopra), il View Factor delle finestre sulle pareti esterne viene ereditato dalle pareti alle quali le finestre sono associate mentre poi in "Shading Control" andrà richiamato il sistema di ombreggiamento che era stato creato in precedenza, e in "Frame And Divider Name" andrà richiamato il telaio o il divisore che sono stati creati precedentemente. Ho usato la voce "Telaio" per indicare le finestre più piccole che di conseguenza non hanno divisori orizzontali né verticali, ma solo la parte esterna di telaio, mentre ho utilizzato la voce "Divisore" per indicare le finestre più grandi che quindi oltre al telaio che le circonda sono dotate anche di un divisore verticale.

4. INSERIMENTO DEGLI APPORTI TERMICI DELLA STRUTTURA

Il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento è la quantità di calore che deve essere fornita ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo, contribuiscono a influenzare il fabbisogno gli apporti interni dovuti a luci, persone, ecc. e gli apporti solari, cioè i contributi gratuiti di energia dovuti alla radiazione solare trasmessa dalle finestre.

4.1 APPORTI INTERNI (INTERNAL GAINS)

Per apporti interni intendiamo apporti gratuiti di energia dovuti a: luci, persone e ad equipaggiamenti di vari tipi che spesso sono significativi nel bilancio termico di zona. EnergyPlus permette di inserire gli apporti interni specificando guadagni di calore per diversi tipi di equipaggiamento; ad esempio persone, luci, gas, equipaggiamento elettrico, ecc. Il guadagno totale di calore è compreso del guadagno convettivo, radiante e latente in diverse proporzioni. Il guadagno convettivo è aggiunto istantaneamente al calore dell'aria di zona. Il guadagno radiante è distribuito sulle superfici di zona, e viene prima assorbito e poi rilasciato nella stanza. Il guadagno latente deve essere modificato dalla ventilazione o dal sistema di aria condizionata.

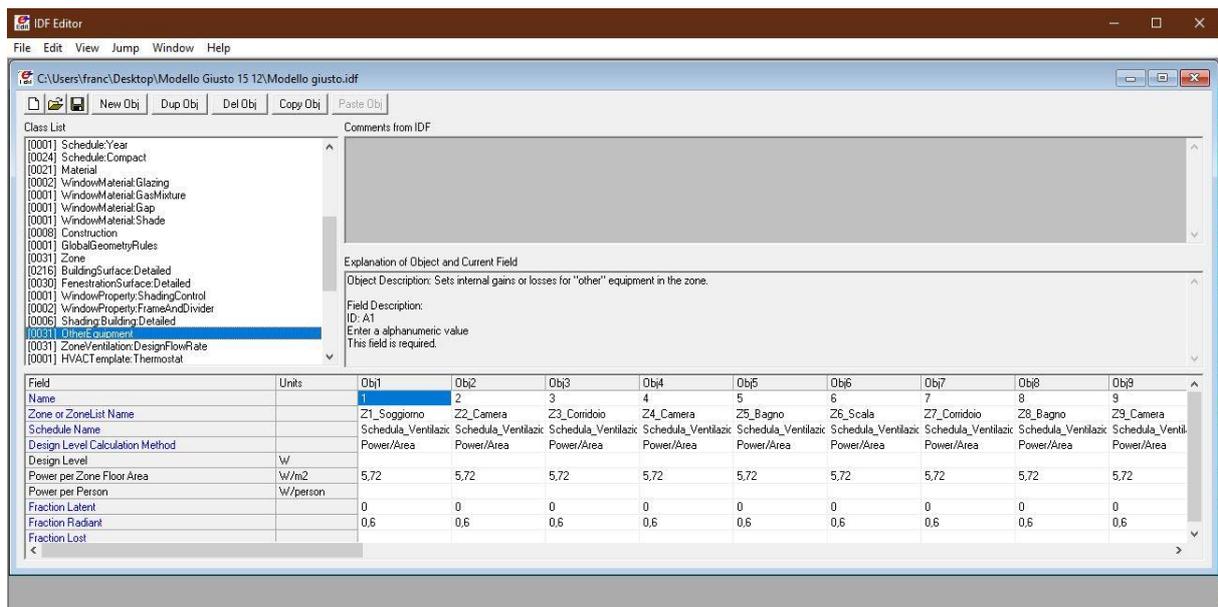


Figura 28. Inserimento degli Apporti Interni

EnergyPlus permette di stabilire nel dettaglio i gains provenienti da persone, luci ed impianti, tuttavia in questo caso avendo disponibile direttamente il dato in W/m^2 , e sapendo quanto di questo apporto fosse radiativo, ho utilizzato l'oggetto "Other Equipment" che permette di introdurre il valore degli apporti interni associato a ciascuna zona, in questo modo il programma svolgerà da solo i calcoli moltiplicandolo per l'area del pavimento di ciascuna zona termica,

inoltre ho potuto inserire anche la frazione radiativa di questi apporti interni. Come si può vedere dai dati il confronto tra gli apporti interni dei vari programmi risulta piuttosto allineato, questo anche grazie al fatto che il calcolo degli apporti interni avviene con una formula piuttosto semplice quindi c'è meno probabilità di errore. I confronti su apporti interni ed apporti solari sono stati fatti sull'appartamento 6 e cioè l'appartamento dell'ultimo piano in direzione sud-est questo per avere meno interferenze possibili da parte del terreno che avrebbero potuto portare ad un'invalidazione dei dati, inoltre per i confronti viene sempre presa in considerazione la zona termica del soggiorno che a causa della presenza maggiore di finestre risulta la più sfavorita nella confronto tra i dati, in modo che se i dati risultano confrontabili in questa zona saranno sicuramente confrontabili anche per le altre. Nella seguente immagine la zona termica in questione viene evidenziata di colore rosso, mentre in blu vengono evidenziate le altre zone termiche relative all'appartamento 6; nella figura successiva vengono inseriti i dati relativi al confronto degli apporti interni ottenuti con le varie metodologie di calcolo rispetto alla zona termica del soggiorno.

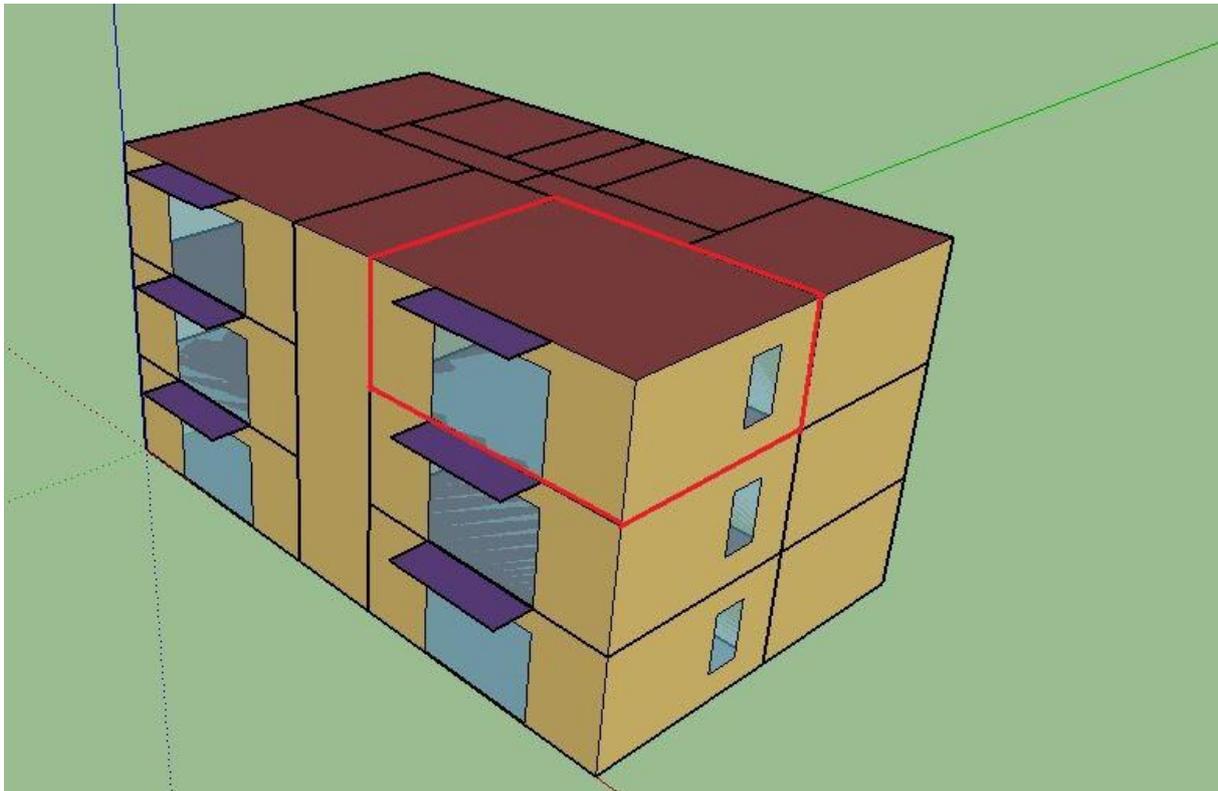


Figura 29. Individuazione della Zona Termica di Riferimento

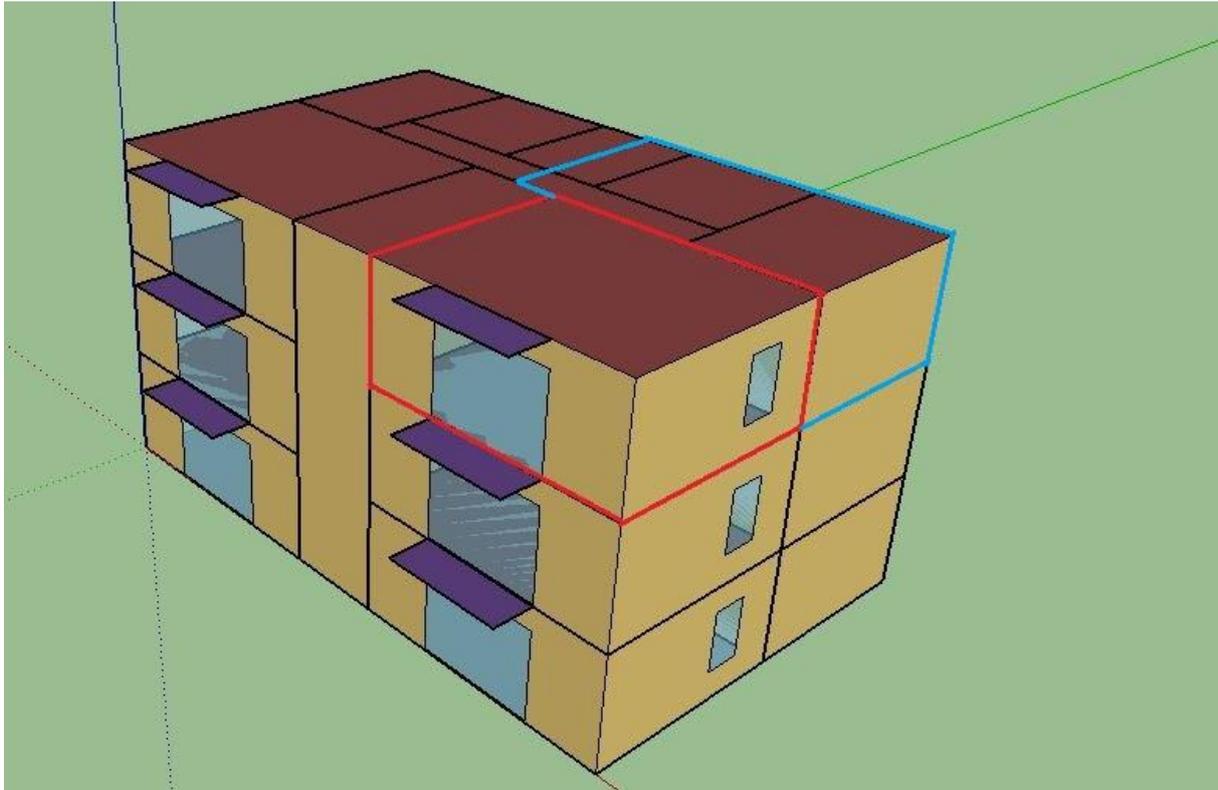


Figura 30. Individuazione dell'Appartamento di Riferimento

Date/Time	Apporti Interni Soggiorno EP [W]	Apporti Interni Soggiorno TRNSYS [W]	Apporti Interni Soggiorno 10349 [W]
01/01 01:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 02:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 03:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 04:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 05:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 06:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 07:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 08:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 09:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 10:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 11:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 12:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 13:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 14:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 15:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 16:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 17:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 18:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 19:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 20:00:00	179.22762	178.58125	179.228
01/01 21:00:00	179.22762	178.58125	179.228

Figura 31. Valori degli Apporti Interni

I valori vengono ottenuti per tutte le ore per ogni giorno dell'anno. Essendo che vengono calcolati con una formula che non varia nelle ore giornaliere i valori di apporti interni risultano uguali per tutte le ore di ciascun giorno.

4.2 APPORTI SOLARI (SOLAR GAINS)

Gli apporti solari riguardano una tecnica di progettazione passiva: la luce entra attraverso le aperture vetrate e fornisce un contributo gratuito in fase di riscaldamento dell'ambiente. La quantità di luce che contribuisce come apporto gratuito dipende dal tipo di vetro della finestra, dalla superficie della finestra stessa, dal fattore di ombreggiamento e da una serie di altri fattori. Gli apporti solari di ciascuna superficie esterna sono dati dalla combinazione della radiazione diretta e diffusa, e vengono calcolati come:

$$Q_{so} = \alpha \cdot \left(I_b \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg} \right)$$

Dove:

α = assorbimento solare della superficie

θ = angolo di incidenza dei raggi solari

S= area della superficie

S_s = area illuminata dal sole

I_b = intensità della radiazione diretta

I_s = intensità della radiazione diffusa dal cielo

I_g = intensità della radiazione diffusa riflessa dal terreno

F_{ss} = fattore angolare tra la superficie ed il cielo

F_{sg} = fattore angolare tra la superficie ed il terreno

Per la superficie di una struttura situata su un piano senza particolari caratteristiche

$$F_{ss} = \frac{1 + \cos \theta}{2}$$

$$F_{sg} = \frac{1 - \cos \theta}{2}$$

Se la superficie è ombreggiata da un dispositivo di shading il programma modifica F_{ss} di un fattore di correzione che tiene conto della distribuzione radiante del cielo. Lo shading della radiazione diffusa del terreno non viene calcolato.

Fondamentale per avere dei corretti valori di solar gains è necessario impostare la **SOLAR DISTRIBUTION** da settare nell'oggetto "Building"; ci sono diverse opzioni che possono essere prese in considerazione per questo lavoro è stata scelta la distribuzione "FullInteriorAndExterior" e cioè: le ombre sulle superfici esterne causate da sistemi di ombreggiamento staccati, ali, sporgenze ecc. di tutte le zone, vengono tenute in considerazione. Vengono conteggiati anche gli ombreggiamenti dovuti a porte e finestre. Per quanto riguarda la radiazione diretta, si assume che tutta quella entrante nella zona cada sul pavimento, dove viene assorbita in base all'assorbenza dello stesso. Tutto ciò che viene riflesso dal pavimento viene aggiunto alla parte di radiazione diffusa trasmessa. Per quanto riguarda la radiazione diretta trasmessa che cade sul pavimento; il programma calcola il quantitativo di radiazione diretta che finisce su ciascuna superficie inclusi pavimento muri e finestre, proiettando i raggi del sole attraverso le finestre esterne, tenendo conto degli effetti delle superfici di ombreggiamento esterne e dei dispositivi di shading. EnergyPlus calcola la distribuzione della radiazione ad onda corta all'interno di ciascuna zona termica. La radiazione consiste nella radiazione diretta, radiazione diffusa e radiazione ad onda corta dalle luci elettriche. Il programma determina la radiazione che viene: 1) assorbita all'interno delle superfici opache, 2) assorbita dal vetro e dai sistemi di ombreggiamento delle finestre, 3) trasmessa all'interno delle zone, 4) trasmessa indietro dalle finestre esterne. La radiazione diffusa viene prima distribuita al trasferimento di calore delle superfici interne nella zona che contiene le finestre esterne. Il quantitativo di questa radiazione diffusa assorbita da ciascuna superficie, e per ciascuno strato della finestra viene prima calcolata per poi essere aggiunta ai valori di radiazione assorbita ad onda corta (short-wave). La radiazione onda corta assorbita da una superficie opaca è data da:

$$Q_{RadSWInAbs}(SurfNum) = QS(ZoneNum) * AbsIntSurf(SurfNum) + AISurf(SurfNum) * BeamSolarRad[W/m^2]$$

Dove:

SurfNum= Numero della superficie

ZoneNum= numero della zona a cui la superficie appartiene

QS(ZoneNum)= irradianza onda corta distribuita in zona [W/m^2]

AbsIntSurf (SurfNum)= assorbimento solare interno della superficie

AI Surf (SurfNum)= fattore di irraggiamento solare interno della superficie

BeamSolarRad= radiazione solare diretta incidente sulla superficie [W/m^2]

Per quanto riguarda la radiazione all'interno della struttura abbiamo che il fattore di irradianza interna viene calcolato come:

$$AI_{Surf}(SurfNum) = \frac{AbsIntSurf(SurfNum)}{A(SurfNum)} \sum_{i=1}^{N_{extwin}} T B m_i * Aoverlap_i(SurfNum) * CosInc_i$$

Dove:

i= numero di finestre esterne

N_{extwin} = numero di finestre esterne nella zona

$CosInc_i$ = coseno dell'angolo di incidenza della radiazione sulla finestra

$T B m_i$ = trasmissione della radiazione solare della finestra

$Aoverlap_i(SurfNum)$ = l'area irradiata dalla radiazione diretta sulla superficie SurfNum e proiettata di nuovo sul piano della finestra i. Queste aree di sovrapposizione sono determinate con le regole di ombreggiamento di EnergyPlus considerando che una finestra esterna di una zona come una superficie di "invio" e la superficie interna di questa zona come superficie "ricevente". Le aree di sovrapposizione per particolari finestre esterne dipendono dalla posizione del sole, dalla geometria della finestra, dalla geometria della superficie interna e la posizione della finestra rispetto alle superfici interne.

4.3 LA RADIAZIONE SOLARE

4.3.1 La sfera celeste

La sfera celeste è una sfera di raggio arbitrario sulla cui superficie sono proiettati, dal centro della sfera, tutti gli astri. Se il centro della sfera coincide con il centro della terra, fisso, allora si parla di sfera celeste geocentrica, alla quale si farà sempre riferimento in seguito. Questo è il sistema di rappresentazione del cielo usato nell'astronomia Tolemaica e in tutta l'astrologia classica, che ovviamente non corrisponde alla realtà; tuttavia è sufficiente a spiegare fenomeni astronomici percepibili dall'occhio umano.

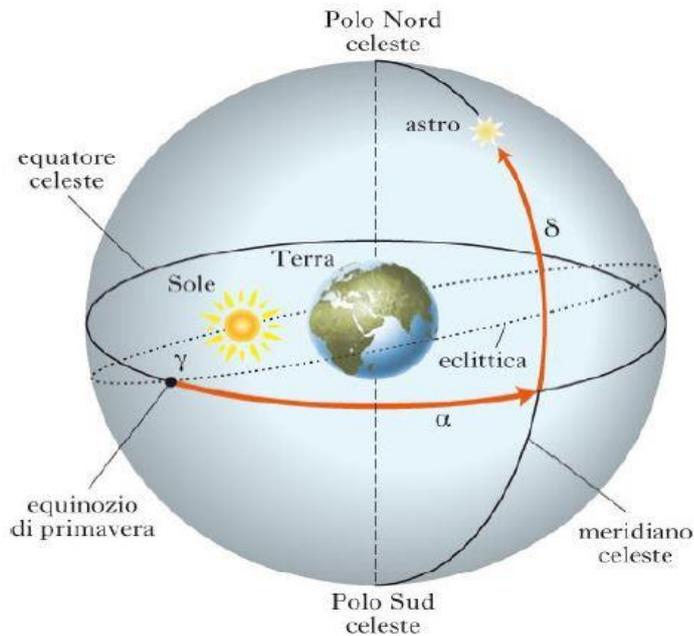


Figura 32. La Sfera Celeste

L'asse di rotazione è la retta attorno alla quale ruota la sfera celeste. I punti di intersezione tra la volta celeste e gli assi di rotazione sono detti poli celesti: il polo nord celeste è la proiezione del polo nord terrestre, così come il polo sud celeste è la proiezione del polo sud terrestre. I circoli della sfera celeste che hanno come centro il centro della sfera sono detti circoli massimi. L'equatore celeste è il circolo massimo della sfera che contiene tutti i punti equidistanti dai poli, e corrisponde alla proiezione dell'equatore terrestre sulla sfera celeste. L'equatore celeste divide la sfera in due metà: l'emisfero celeste nord (che contiene il polo nord celeste) e l'emisfero celeste sud (che contiene il polo sud celeste). L'eclittica è il circolo massimo della sfera celeste, inclinato mediamente di $23^{\circ}27'$ rispetto all'equatore, che rappresenta la proiezione sulla sfera celeste del piano orbitale della Terra intorno al Sole. Il Sole, ad un osservatore posto sulla terra, sembra muoversi lungo l'eclittica. Da un punto di vista geocentrico l'eclittica rappresenta la proiezione di tutti i punti della congiungente centro della Terra-Sole sulla sfera celeste. Gli equinozi sono i due punti in cui l'eclittica interseca l'equatore. Quando il Sole passa per questi punti la durata del giorno è uguale a quella della notte. Durante il 21 marzo, quando il sole si trova nell'equinozio, ha inizio la primavera astronomica. L'equinozio che ha luogo il 23 settembre dà l'inizio all'autunno astronomico. I solstizi sono i 2 punti in cui l'eclittica raggiunge la massima distanza dall'equatore. Il 21 giugno il sole si trova al solstizio d'estate, raggiunge il punto più alto sull'equatore, si trova nel punto più vicino al polo nord celeste ed il giorno ha la sua durata massima rispetto alla notte (inizio dell'estate astronomica); il 21 dicembre il sole si trova al solstizio d'inverno, si trova nel punto più vicino al polo sud celeste e raggiunge il punto più basso rispetto all'equatore ed il giorno ha la sua durata minima (inizio dell'inverno astronomico).

4.3.2 Altezza solare ed angolo azimutale

Per riferirsi alla posizione solare si utilizza un sistema di coordinate celesti riferite ad un punto di osservazione sulla Terra, ovvero l'angolo di altezza solare α e l'angolo azimutale γ . Per un osservatore che dalla terra osserva il cielo, il percorso del sole sulla volta celeste assume la forma di un arco che varia sia durante il corso dell'anno che con la latitudine del luogo di osservazione. Durante il corso dell'anno la durata delle ore di luce ed il percorso del Sole subiscono delle variazioni al susseguirsi delle stagioni. L'altezza solare è l'angolo formato dalla retta Sole-Terra con il piano dell'orizzonte. L'azimut solare è l'angolo formato dalla retta Sole-Terra sul piano dell'orizzonte con la direzione sud e si assume positivo verso est. Nella figura successiva viene schematizzato questo sistema di coordinate

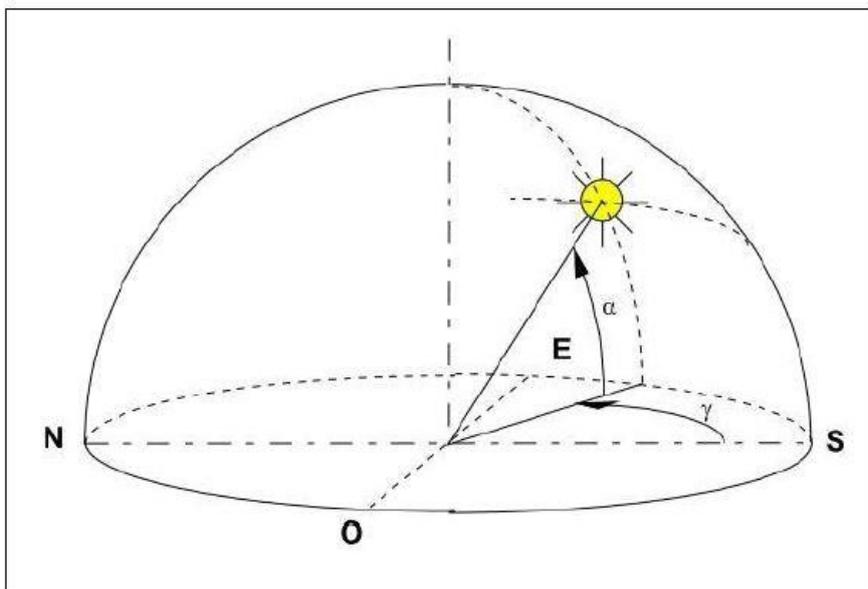


Figura 33. Altezza Solare ed Angolo Azimutale

L'altezza solare e l'azimut solare dipendono a loro volta dalla declinazione solare δ , dalla latitudine φ e dall'angolo orario ω . Essi possono essere calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$\alpha = \arcsin (\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega)$$

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha} \right)$$

Conoscendo quindi la latitudine, la declinazione e l'angolo orario, le due relazioni consentono di determinare la posizione del Sole.

4.3.3 Declinazione Solare

La declinazione è l'angolo formato dalla direzione del sole con il piano dell'equatore celeste; essa varia durante l'anno al massimo di $-23^{\circ}27'$ in inverno ad un valore di $23^{\circ}27'$ in estate. Essa può essere calcolata mediante la formula di Cooper:

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left(360 \frac{284 + g}{365} \right)$$

Dove g rappresenta il numero di giorni dell'anno trascorsi dal primo gennaio.

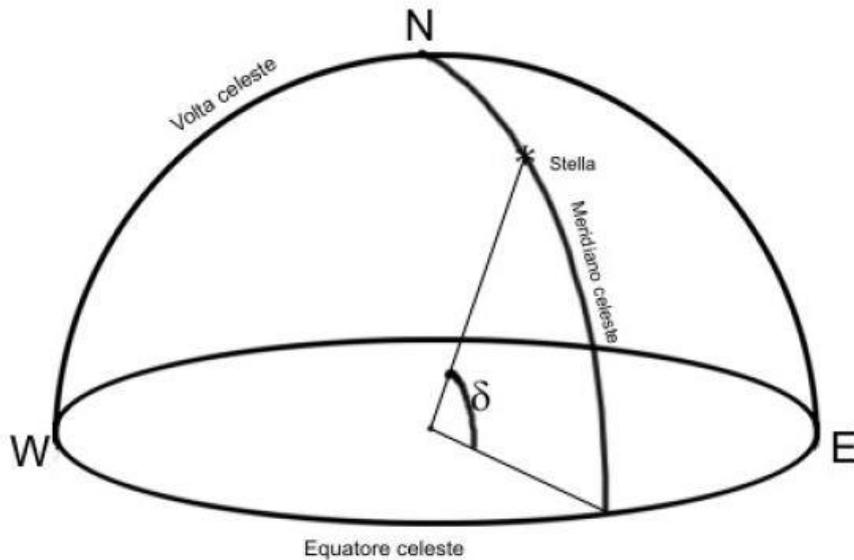


Figura 34. Declinazione Solare

4.3.4 Latitudine

La latitudine è l'angolo formato dalla congiungente del punto di osservazione con il centro della Terra e con il piano dell'equatore. Essa assume valore 0° all'orizzonte e 90° al polo.

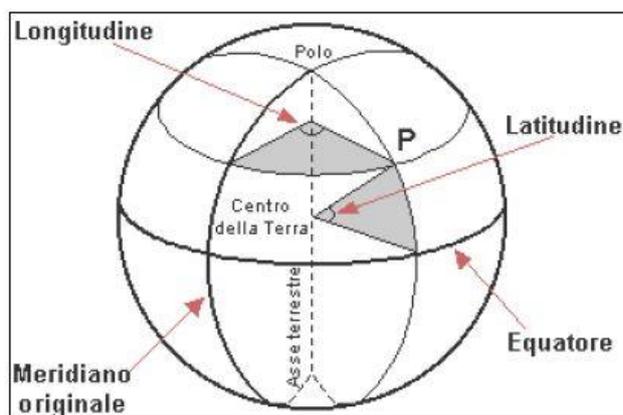


Figura 35. Latitudine

4.3.5 Angolo orario

L'angolo orario è l'angolo formato dal piano meridionale passante per il Sole con il meridiano di riferimento e assume valori compresi tra -180° e 180° variando di 15° ogni ora. Può essere calcolato tramite la relazione:

$$\omega = 15 \cdot h_{sol} - 180^\circ$$

Dove h_{sol} rappresenta l'ora solare

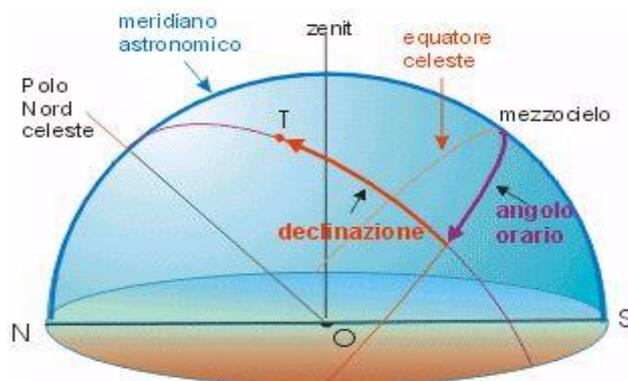


Figura 36. Angolo Orario

4.3.6 Ora Solare

L'ora solare h_{sol} può essere determinata a partire dall'ora convenzionale e dalla longitudine del punto di osservazione.

$$h_{sol} = h_{conv} + \frac{E - 4(\lambda_{mr} - \lambda_{oss})}{60}$$

Dove h_{conv} è l'ora convenzionale segnata dall'orologio, λ_{mr} è la longitudine del mediano di riferimento e λ_{oss} è la longitudine del punto di osservazione, E rappresenta l'equazione del tempo.

4.3.7 Equazione del tempo

L'equazione del tempo E rappresenta una correzione, dovuta alla seconda legge di Keplero, per la quale la velocità di rivoluzione della Terra intorno al Sole non è costante durante l'anno. La sua formulazione è la seguente:

$$E = -10.1 \sin\left(360 \frac{2g + 31}{366}\right) - 6.9 \sin\left(360 \frac{g}{366}\right)$$

Il valore di E può anche essere determinato mediante l'utilizzo di grafici o tabelle.

4.3.8 Costante solare e irradianza exatmosferica

L'energia solare si propaga nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche la cui distribuzione, in funzione della lunghezza d'onda, viene detta spettro solare. La radiazione solare si estende su tutto lo spettro elettromagnetico dai raggi γ ai raggi x, attraverso l'ultravioletto (UV) il visibile e l'infrarosso, fino alle microonde ed alle radioonde. Tuttavia la parte più significativa dello spettro è compresa tra l'ultravioletto e l'infrarosso.

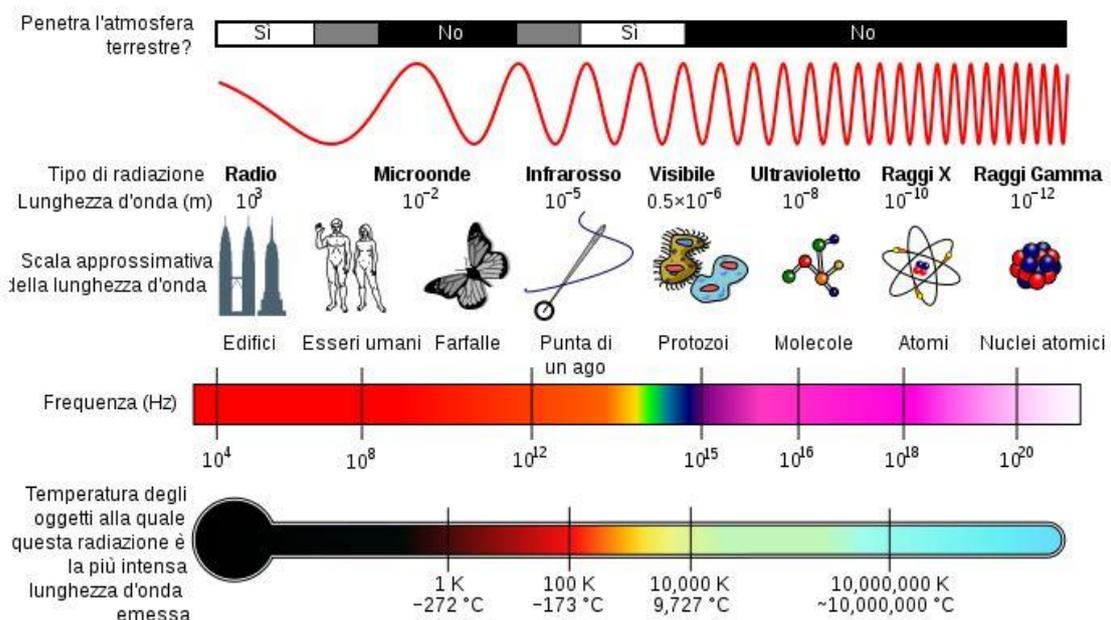


Figura 37. Lo Spettro Solare

Limitatamente alle bande dell'infrarosso (1mm-700nm) e del visibile (700nm-400nm), lo spettro può essere approssimato allo spettro di un corpo nero alla temperatura di 5776 K.

Nell'attraversare l'atmosfera una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (scattering) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapore acqueo, le nubi e gli aerosol). L'attenuazione interessa tutte le lunghezze d'onda dello spettro, però in maniera differenziata, per cui lo spettro elettromagnetico risultante assume un profilo irregolare

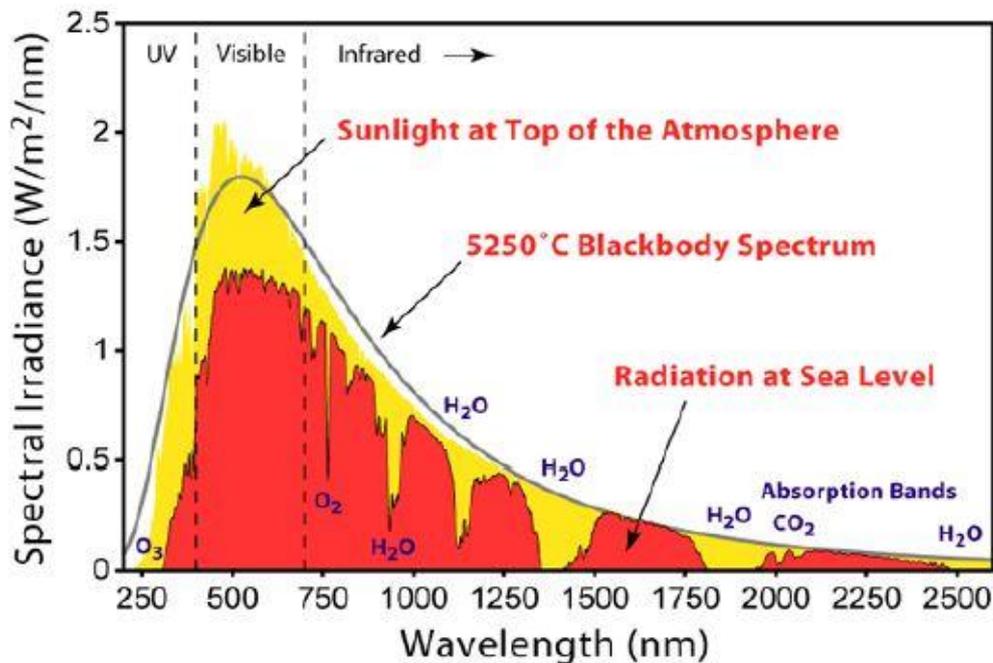


Figura 38. Attenuazione

La radiazione che raggiunge il suolo è distribuita quasi interamente in tre zone dello spettro di lunghezze d'onda:

- 300-370nm (UV) 2,3%
- 380-780nm (visibile) 54%
- 790-2500nm (infrarosso) 42,4 %

La costante solare I_{sc} è l'irradianza misurata esternamente all'atmosfera terrestre, (ad una distanza media Terra-Sole di $1,495 \cdot 10^{11}$ m) su un piano normale ai raggi solari. Valori affidabili della costante solare possono essere effettuati solo dallo spazio ed il valore suggerito dal World Meteorological Organization è di 1367 W/m^2 .

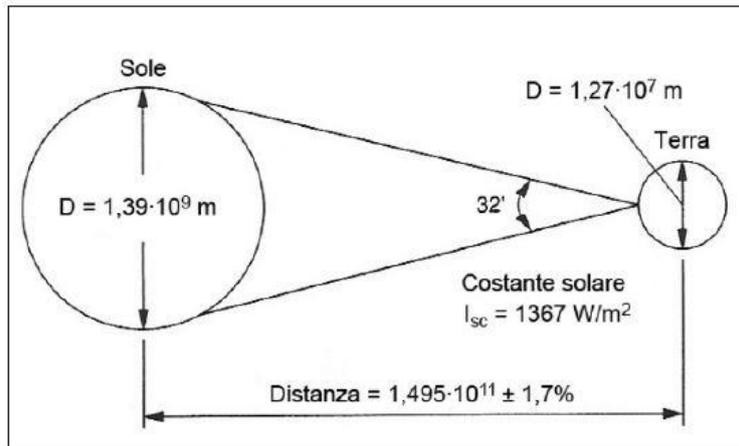


Figura 39. Costante Solare

A causa dell'eccentricità dell'orbita terrestre la distanza Terra-Sole non è costante durante l'anno, subendo variazioni del $\pm 1,7\%$ rispetto alla distanza media. Ciò determina una variazione durante l'anno della radiazione extraatmosferica del $\pm 3,3\%$. La relazione che descrive l'andamento dell'irradianza su base annua è la seguente:

$$I_{on} = I_{sc} \cdot \varepsilon$$

dove:

I_{on} = è l'irradianza extraatmosferica misurata su un piano normale alla radiazione [W/m^2]

ε = è il fattore di correzione della costante solare ed è quindi adimensionale

In letteratura esistono diversi metodi per calcolare il fattore di correzione della costante solare, il più semplice dei quali è mediante la relazione:

$$\varepsilon = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi \cdot g}{365}\right)$$

Dove g rappresenta il numero di giorni dell'anno trascorsi dal primo gennaio.

4.3.9 Componenti della radiazione solare

In un giorno sereno la potenza incidente su una superficie di generica disposizione ed orientamento è pari alla somma della radiazione solare diretta, diffusa e riflessa al suolo.

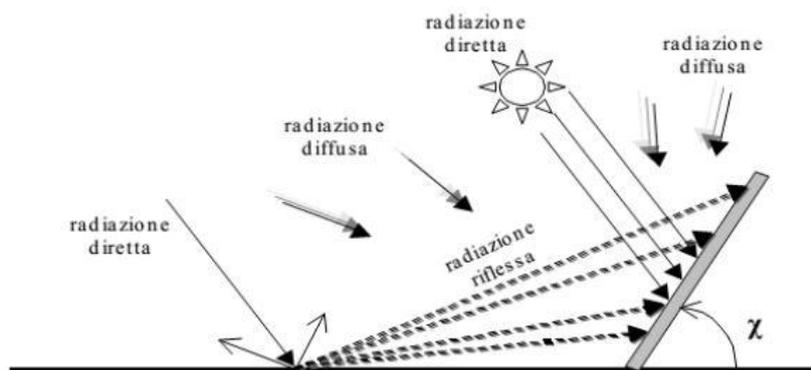


Figura 40. Componenti della Radiazione Solare

La **radiazione solare diffusa** rappresenta la quantità di radiazione che ha colpito almeno una particella dei gas atmosferici, questo ha causato un cambio dell'angolo di incidenza ma comunque questo tipo di radiazione arriva al suolo

La **radiazione solare diretta** è la componente della radiazione che raggiunge direttamente il suolo terrestre. La quantità di radiazione che colpisce la superficie è proporzionale al coseno dell'angolo di incidenza: è massima quando l'angolo di incidenza è perpendicolare.

La **radiazione solare riflessa** è quella quota parte della radiazione solare incidente che viene riflessa dalla superficie terrestre per effetto dell'albedo. L'albedo è la frazione di radiazione incidente che viene riflessa in tutte le direzioni, ed indica dunque il potere riflettente di una superficie. L'esatto valore di questa frazione dipende, per lo stesso materiale, dalla lunghezza d'onda della radiazione considerata. Se la parola albedo viene utilizzata senza ulteriori specifiche si riferisce allo spettro del visibile. L'albedo ha valori compresi tra 0 ed 1 ed il suo valore medio sulla superficie terrestre è di circa 0,4.

4.4 VALUTAZIONE DEGLI APPORTI SOLARI

Una volta impostati tutti i parametri (come stabilito nei capitoli precedenti) riguardanti materiali, costruzione, vetri delle finestre, shading ecc. si è passato alla simulazione del modello selezionando nella sezione "Output:Variable" le variabili di output che volevamo che il programma tirasse fuori.

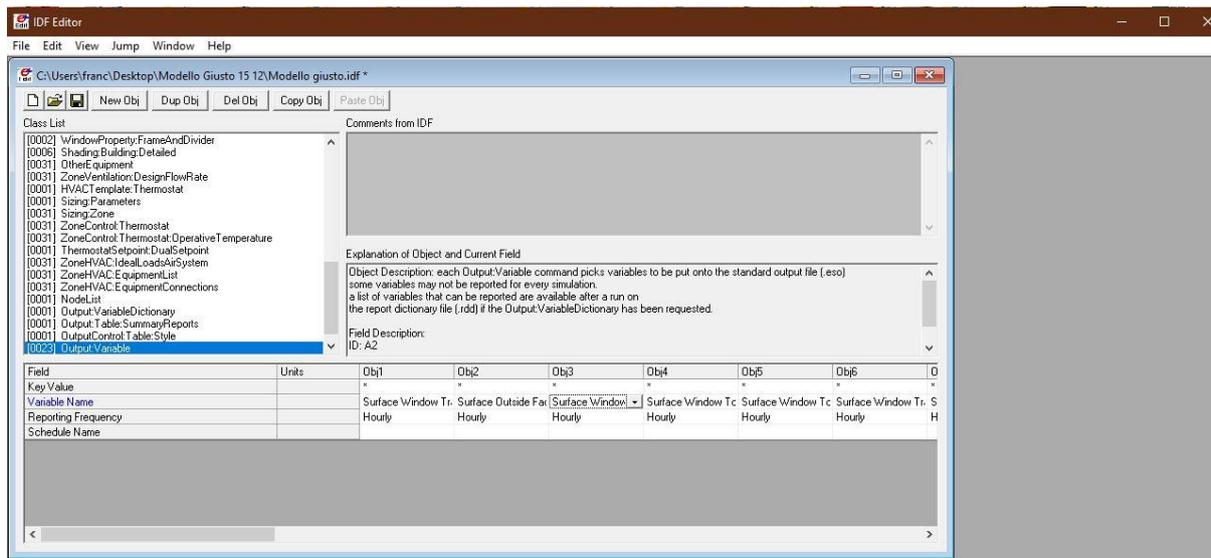


Figura 41. Scelta delle Variabili

Prima di arrivare alle variabili effettivamente prese in considerazione sono state fatte numerose prove cercando tra le numerose variabili disponibili nel database di EnergyPlus essendo che anche se si dispone della descrizione di ciascuna variabile, questa non è molto chiara di conseguenza si è reputato necessario l'effettuare varie prove con più variabili per giungere a quelle che sarebbero effettivamente poi servite all'interno dei confronti con gli altri algoritmi di calcolo. Le variabili che sono state prese in considerazione per queste prove sono:

- Surface outside face incident solar radiation (rate per area)

Questa rappresenta, ovviamente, la somma di radiazione diretta, diffusa e riflessa incidenti su una superficie. Rate per area indica che EnergyPlus ci fornirà il dato in W/m^2 e questa viene indicata per ogni superficie (sia pareti che finestre) esterna dell'edificio.

- Surface window transmitted solar radiation (rate)

EnergyPlus definisce questa variabile come il quantitativo di radiazione diretta e diffusa che entra in una zona termica attraverso una finestra esterna; ed è la somma di altre due variabili e cioè "Surface window transmitted beam solar radiation (rate)", che rappresenta la radiazione diretta che viene trasmessa dalla finestra, e "Surface window transmitted diffuse solar radiation (rate)", che rappresenta la radiazione diffusa che viene trasmessa dalla finestra. Essendo che c'è un sistema di schermatura ciascuna di queste due è ottenuta dalla somma di altre due grandezze. La prima la si ottiene come somma di "Surface window transmitted beam to beam solar radiation (rate)", che viene

descritta come la quantità di radiazione solare che viene trasmessa direttamente passando tra le alette del sistema di schermatura, e “Surface window transmitted beam to diffuse solar radiation (rate)”, che viene descritta come la quantità di radiazione che viene riflessa dalle alette della schermatura e che viene trasmessa come radiazione diffusa. La stessa distinzione viene fatta per le componenti della radiazione diffusa, il “rate” indica che EnergyPlus fornirà i dati in Watt.

Una volta fatta la simulazione EnergyPlus fornisce un file in formato .csv che dovrà essere importato tramite Excel nel quale vengono forniti tutti i dati che sono stati richiesti per tutte le ore della giornata e per tutto il periodo di simulazione.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Date/Time	Radiazione Globale EP SUD [W/m2]	Radiazione Trasmessa SUD EP [W]	Radiazione Trasmessa SUD EP [W/m2]	Radiazione Globale EST EP [W/m2]	Radiazione Trasmessa EST EP [W]	Radiazione Trasmessa EST EP [W/m2]	Radiazione Trasmessa Alla Zona Termica EP [W]	Radiazione Globale 10349 SUD [W/m2]	Radiazione Globale EST 10349 [W/m2]	Radiazione Trasmessa Alla Zona Termica 52016 [W]	Radiazione Globale TRNSYS SUD [W/m2]	Radiazione Trasmessa Alla Zona Termica TRNSYS [W]
1													
2	01/01 01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
3	01/01 02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
4	01/01 03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
5	01/01 04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
6	01/01 05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
7	01/01 06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
8	01/01 07:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
9	01/01 08:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0.59745062	0.60	1.776505106	0	1.646534466
10	01/01 09:00:00	5.819651587	14.53476022	3.059949519	6.248293252	3.577782853	4.83484169	18.11254307	5.876912201	5.91	17.80653381	6.24395561	16.5540096
11	01/01 10:00:00	20.42570961	50.52317883	10.6364587	20.21615478	11.28221601	15.2462379	61.80539484	23.29406489	22.66	70.14884383	23.693868	65.35242932
12	01/01 11:00:00	46.73803031	118.3124847	24.90789152	42.23858692	23.23890528	31.4039261	141.55139	48.09620481	44.85	144.278762	51.6723574	134.9605899
13	01/01 12:00:00	63.71120391	162.5301029	34.21686377	52.01279549	28.20315208	38.1123677	190.733255	64.04839411	56.94	191.243174	70.1077935	179.4605816
14	01/01 13:00:00	90.57006609	236.4985194	49.78916199	59.12861204	32.70008434	44.1893032	269.1986038	85.92011673	67.81	256.7745803	97.9722412	242.3861989
15	01/01 14:00:00	176.6700392	489.1090075	102.9703174	69.91637526	38.6947093	52.2901477	527.8037167	140.7636435	61.42	422.5552614	180.730331	406.8396223
16	01/01 15:00:00	194.610196	552.5255264	116.3211635	57.37261963	31.75245899	42.9087284	584.2779854	156.4677657	1.96	468.9909313	195.748483	457.2839237
17	01/01 16:00:00	30.53039688	80.73663574	16.99718647	19.15965179	10.60376991	14.3294188	91.34040565	34.14253517	7.04	100.924471	32.8287607	96.54735302
18	01/01 17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
19	01/01 18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0

Figura 42. Dati Riguardanti la Radiazione Trasmessa

Riordinati i dati provenienti da EnergyPlus ed inseriti i dati provenienti dagli altri algoritmi di calcolo si è proceduto al confronto sulla finestra a sud sia per tutta la durata del periodo di simulazione sia per alcuni giorni specifici scelti sulla base dei punti con differenze maggiori tra i vari algoritmi nei grafici delle simulazioni annuali. Di seguito vengono riportati prima i grafici di confronto della radiazione globale tra i vari algoritmi di calcolo (in direzione EST e SUD) e poi i confronti relativi alla radiazione trasmessa dalle finestre con i vari algoritmi di calcolo, in questo caso i confronti sono stati svolti sulla zona termica (come specificato precedentemente la zona termica scelta è quella del soggiorno situato a SUD-EST) essendo che TRNSYS non permette di estrapolare i dati della radiazione trasmessa differenziandoli tra la finestra rivolta a SUD e quella rivolta ad EST. I confronti sono stati fatti su tutto il periodo di simulazione, in seguito verranno riportati i confronti su base giornaliera in alcuni giorni ritenuti particolarmente significativi per verificare meglio le differenze di calcolo che intercorrono tra i vari algoritmi.

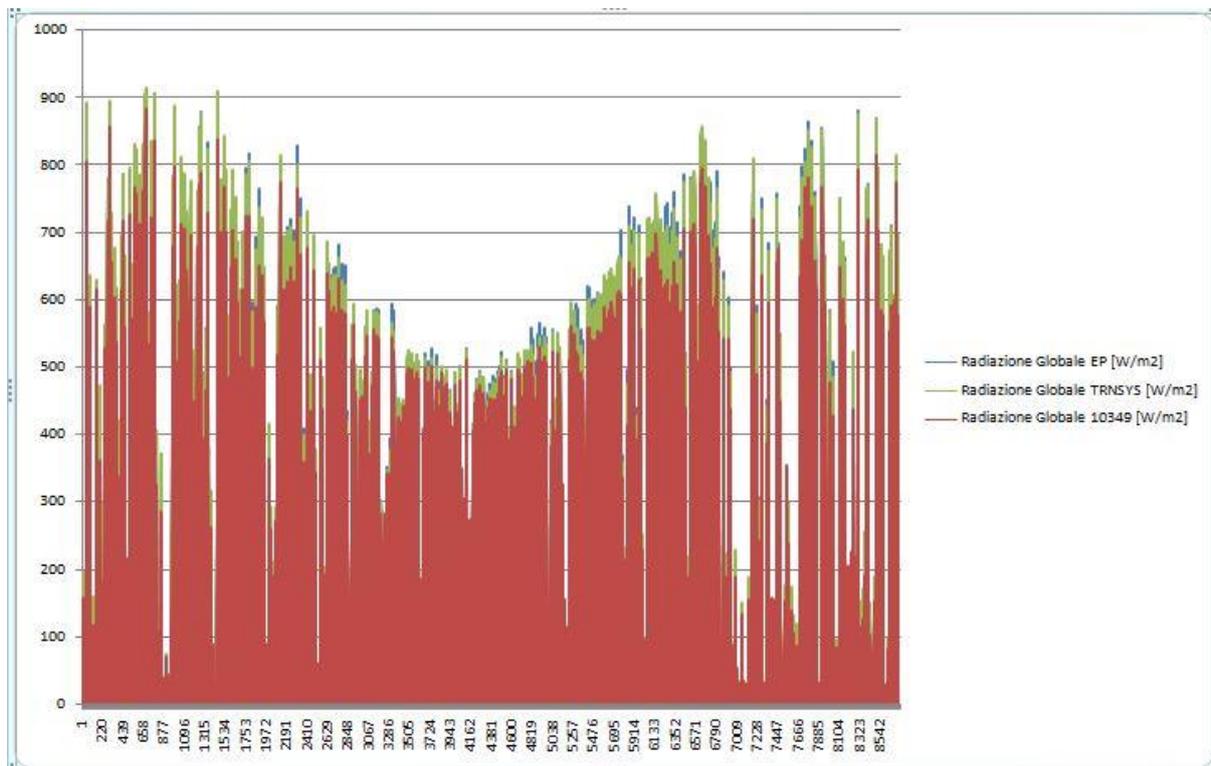


Figura 43. Confronto Radiazione Globale Sud

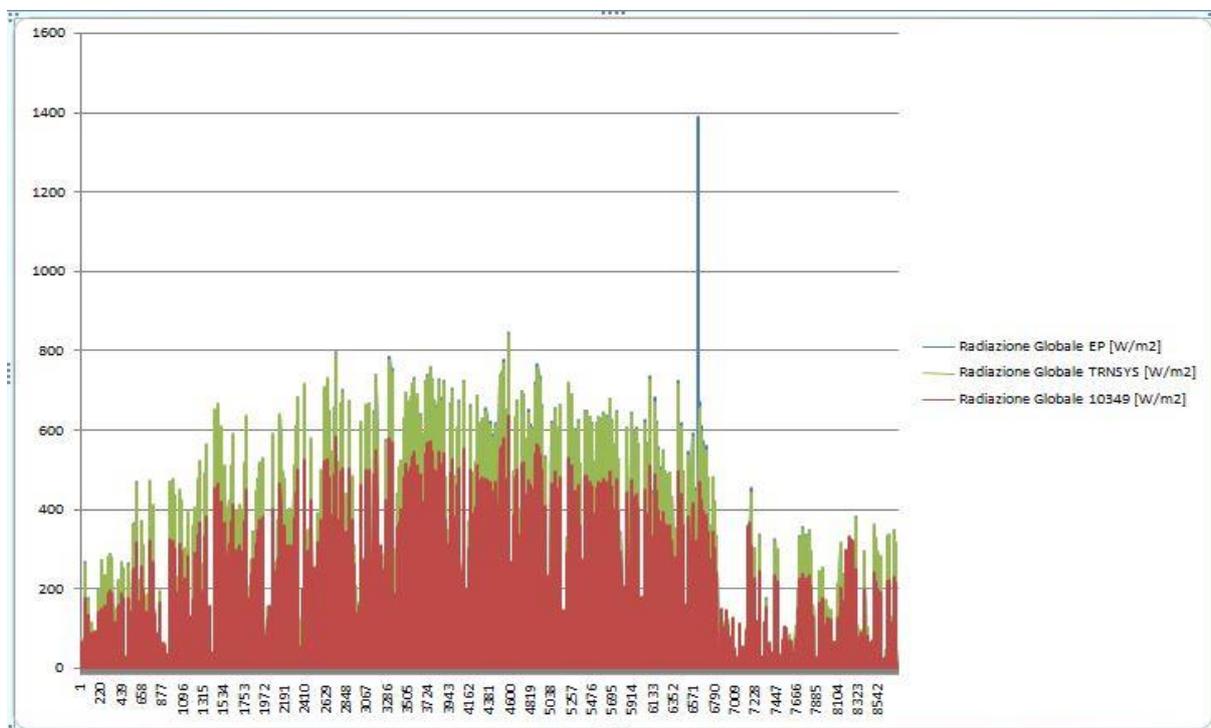


Figura 44. Confronto Radiazione Globale Est

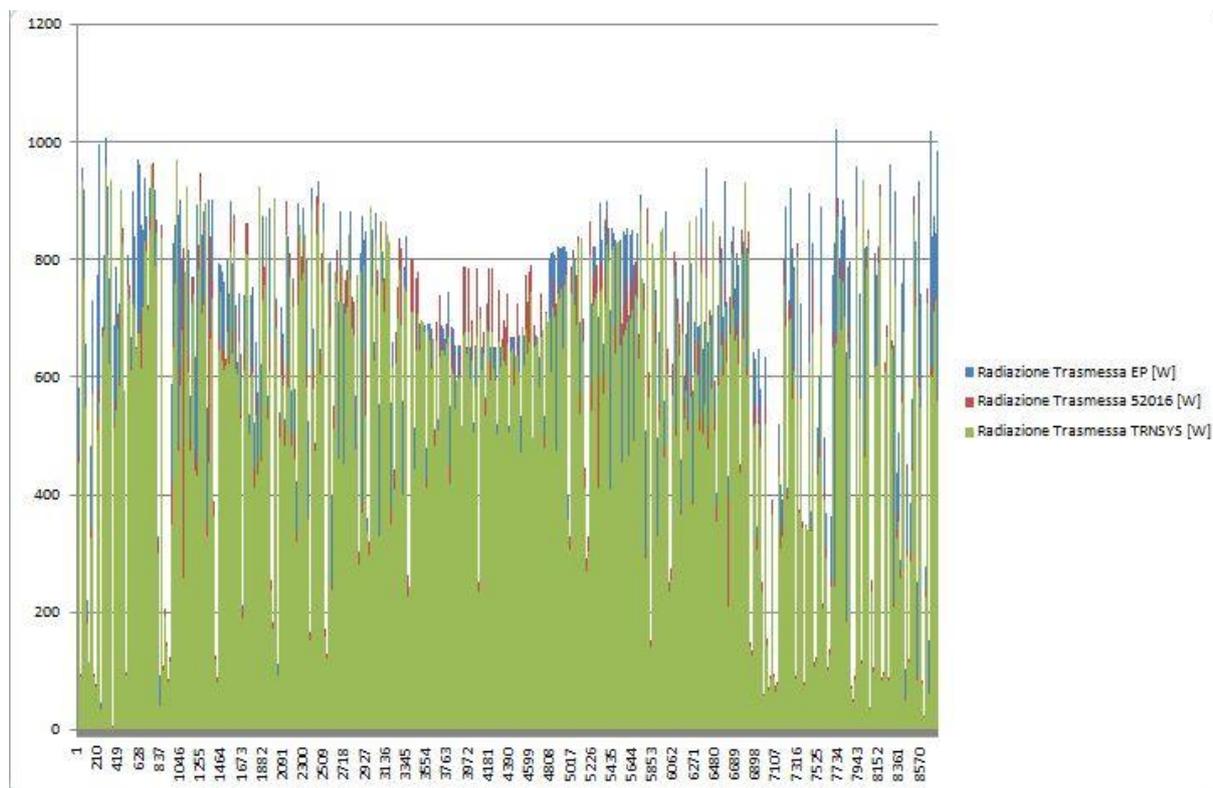


Figura 45. Confronto Annuale Radiazione Trasmessa

Come si può notare dal grafico la trasmissione annuale della radiazione all'interno della zona termica calcolata con i vari algoritmi di calcolo risulta sostanzialmente allineata; sono stati scelti alcuni giorni dell'anno rappresentativi dei punti con maggiori differenze tra i tre algoritmi. Si può già notare come la radiazione trasmessa tenda ad essere più allineata nei mesi estivi. In estate la finestra a sud è soggetta maggiormente all'ombreggiamento degli aggetti (essendo in estate il sole più alto rispetto all'inverno questo provoca un ombreggiamento maggiore sulla finestra a sud) di conseguenza i dati tendono ad essere più allineati dato che alla finestra arriva un quantitativo minore di radiazione e di conseguenza anche quella trasmessa cala, mentre in inverno tende ad essere più alta rispetto a quella degli altri programmi, ma rimane comunque allineata quando si vanno a fare confronti più mirati (es. i confronti nelle 24 ore). I grafici di confronto della radiazione trasmessa sono proposti in seguito

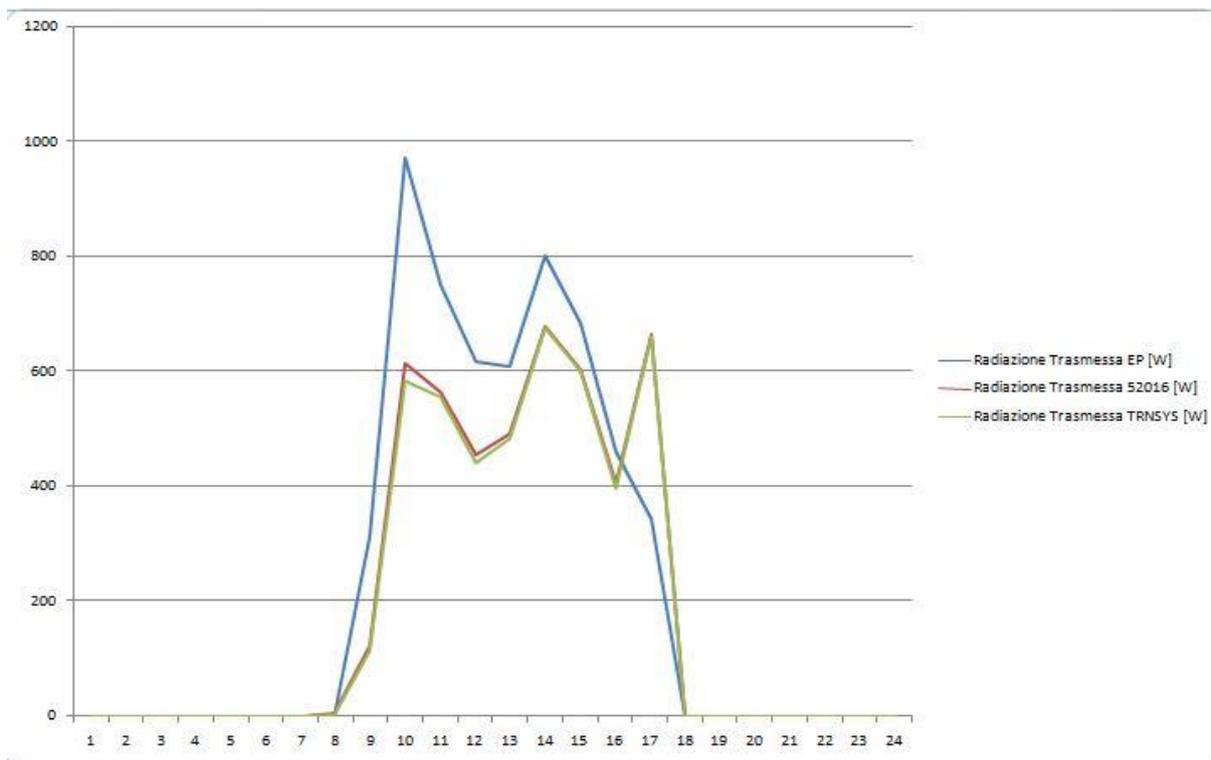


Figura 46. Confronto 26 Gennaio Radiazione Trasmessa

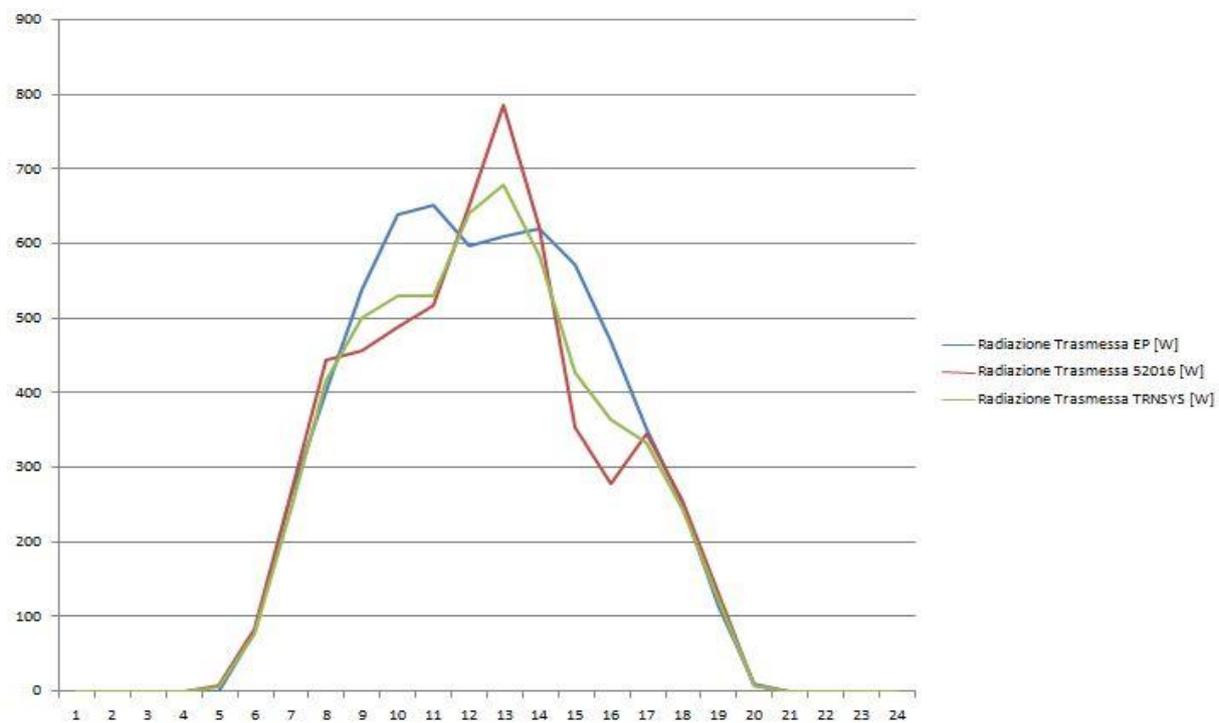


Figura 47. Confronto 15 Giugno Radiazione Trasmessa

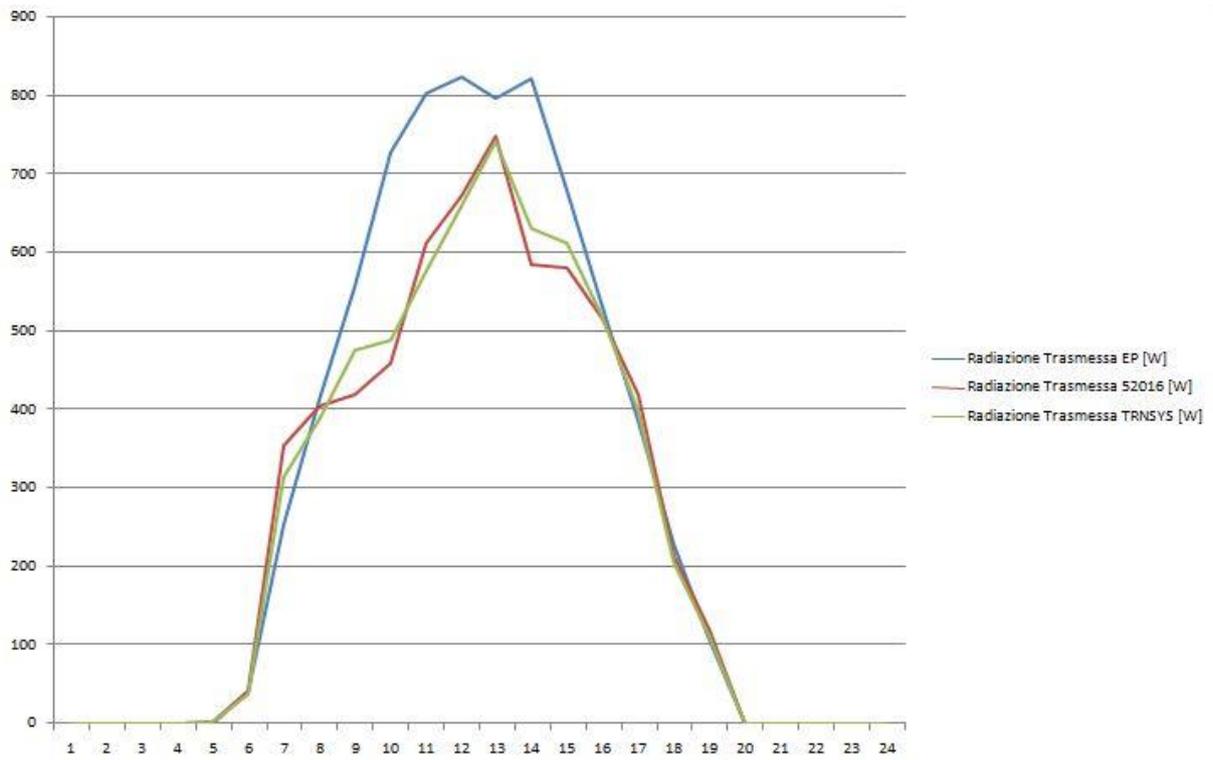


Figura 48. Confronto 23 Luglio Radiazione Trasmessa

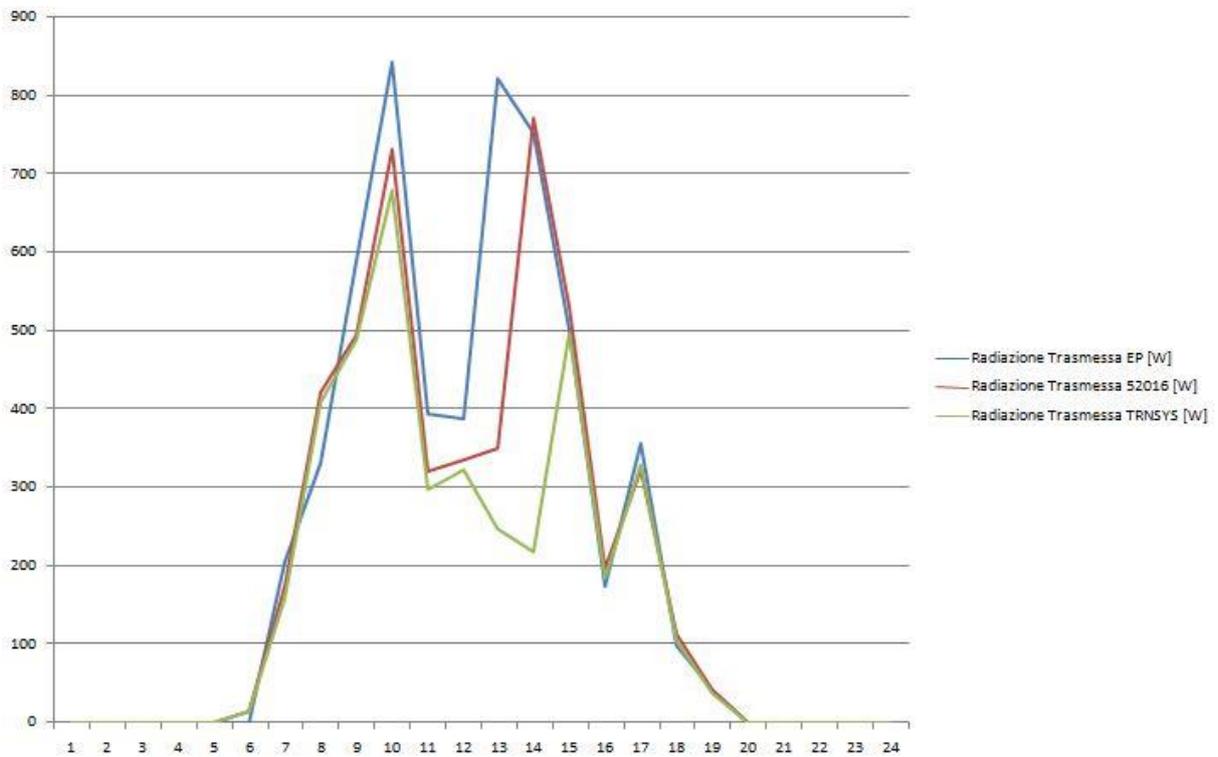


Figura 49. Confronto 21 Agosto Radiazione Trasmessa

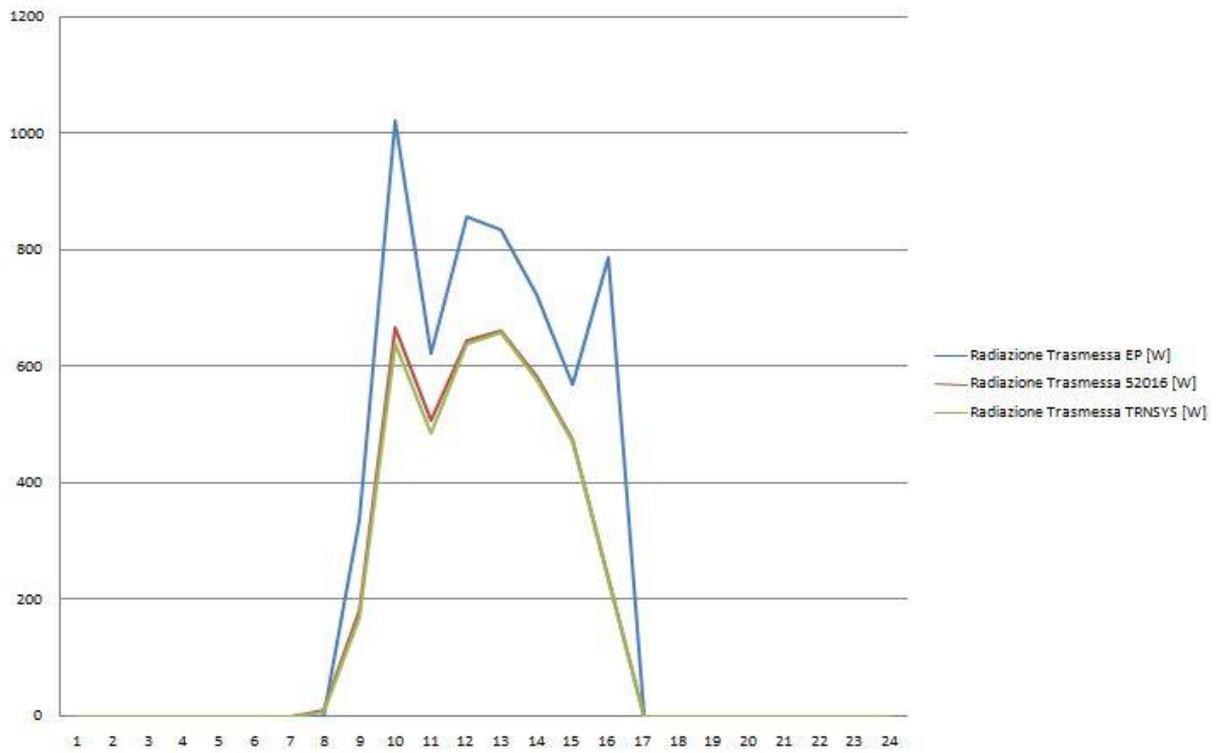


Figura 50. Confronto 18 Novembre Radiazione Trasmessa

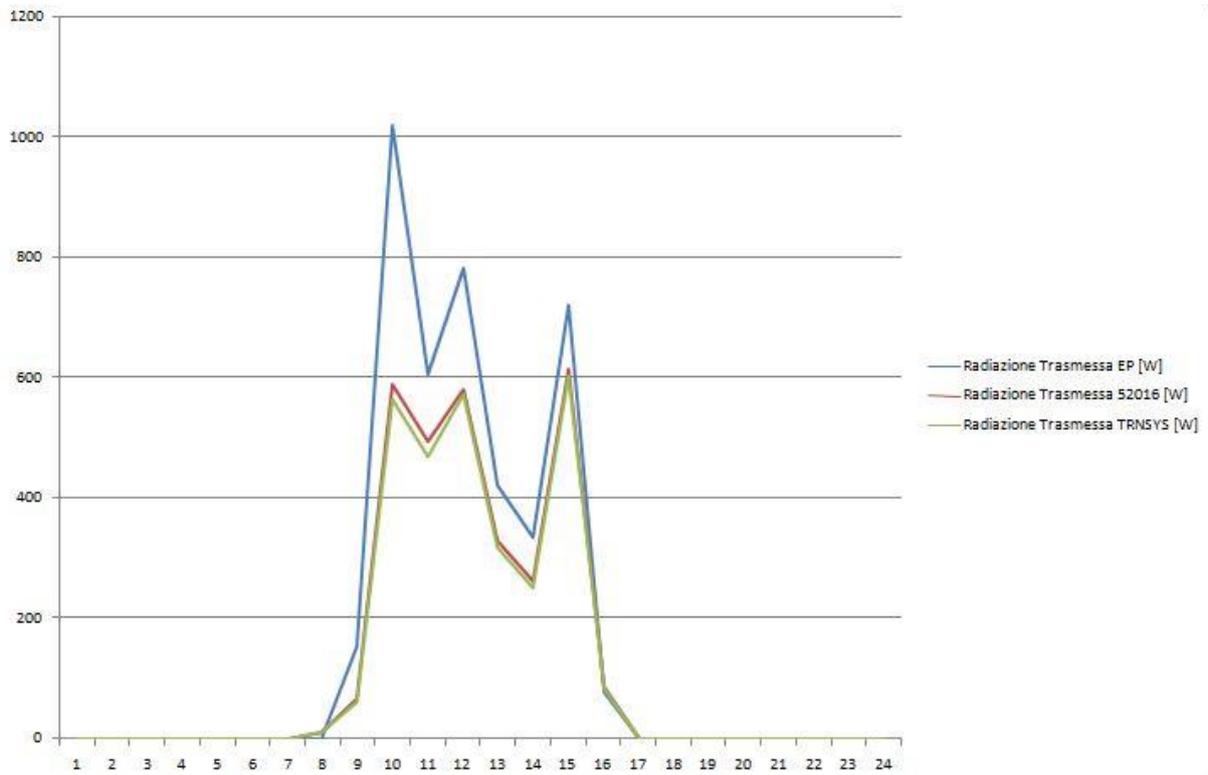


Figura 51. Confronto 28 Dicembre Radiazione Trasmessa

Dai grafici sopra riportati si evince come i dati siano comunque allineati tra i tre algoritmi di calcolo anche se comunque EnergyPlus tende a mantenere una radiazione trasmessa più alta rispetto a quella di TRNSYS e dell'applicativo della 52016. Si può anche notare che gli andamenti sono circa gli stessi (tolto qualche picco in più o in meno di EnergyPlus dovuto probabilmente alle diverse metodologie di calcolo), l'andamento dei grafici di EnergyPlus ricalca sostanzialmente quello degli altri due algoritmi rimanendo però più in alto a livello di radiazione trasmessa. I picchi di differenza che vengono registrati sono di circa 400W, l'algoritmo di calcolo di EnergyPlus nonostante abbia gli stessi dati di input e la stessa stratigrafia delle finestre degli altri programmi tende comunque a mantenere una radiazione trasmessa maggiore rispetto a quella calcolata dagli altri due algoritmi di calcolo. Come già accennato il confronto risulta maggiormente allineato nella stagione estiva quando il sole è più alto e quindi c'è una maggiore incidenza dello shading dovuto all'oggetto sulla finestra a sud, non cambia niente invece per quanto riguarda la finestra ad est dato che su quell'orientamento non ci sono oggetti.

5. LA VENTILAZIONE

5.1 GENERALITÀ SULLA VENTILAZIONE

La ventilazione degli ambienti serve a mantenere la qualità dell'aria al loro interno confortevole, attraverso un ricambio d'aria. La ventilazione è il movimento volontario dell'aria dovuto a fenomeni naturali o a sistemi automatizzati che sono direttamente controllabili. Nel primo caso si parla di ventilazione naturale, generata dal vento o da fattori ad esso collegati. Nel secondo caso si parla di ventilazione meccanica (controllata). Il vantaggio della ventilazione naturale sta nel fatto che a seguito di una corretta progettazione dell'edificio, la sua gestione risulta molto economica, ed è particolarmente adatta ad ambienti non lavorativi. Il tasso di ricambio è fondamentale per avere un ambiente confortevole in quanto permette di avere aria nuova pulita e di controllare il tasso di umidità nell'aria presente all'interno dell'ambiente. Il tasso di ricambio deve essere orientato al fabbisogno d'aria delle persone che si trovano in un determinato ambiente oppure al volume dell'ambiente stesso a seconda della sua destinazione d'uso. All'interno di un ambiente l'aria penetra in due modi differenti. Per ventilazione e cioè tramite l'immissione volontaria di aria all'interno di un ambiente confinato; oppure per infiltrazione cioè tramite l'introduzione d'aria involontaria, dovuta cioè agli "spifferi" provenienti dagli infissi o dagli impianti. La ventilazione permette di migliorare la qualità del confort presente in un ambiente andando ad agire direttamente sulla qualità dell'aria. L'aria è considerata di qualità accettabile quando non contiene inquinanti specifici in quantità ritenute dannose, ovvero quando almeno l'80% degli occupanti esprime soddisfazione nei confronti dell'ambiente (standard ASHRAE 62/1989). La qualità dell'aria deve soddisfare alcuni aspetti:

- Potersi distribuire uniformemente all'interno degli ambienti
- Garantire in tutte le condizioni il ricambio minimo attraverso la ventilazione
- Effettuare un filtraggio con l'efficacia prevista in base al tipo di utenza
- Ridurre al minimo i livelli di polveri ed inquinanti

Il tasso di ricambio orario viene calcolato come:

$$n = \frac{q_v}{V}$$

dove

n= tasso di ricambio orario (h^{-1})

q_v = portata d'aria ($\frac{m^3}{h}$)

V= volume d'aria dell'ambiente (m^3)

Per gli edifici residenziali si può assumere un tasso di ricambi orari pari a 0,3 volumi/ora come prescritto dalla norma UNI 10344 per ambienti non artificialmente ventilati. Per tutti gli altri edifici si assumono i tassi di ricambi d'aria riportati nella norma UNI 10339. L'aria interna va perciò ricambiata con quella esterna che viene considerata di qualità superiore anche se anch'essa contiene sostanze inquinanti che possono contaminare l'aria interna. Gli impianti e le persone sono le cause principali di inquinamento. Infatti da un lato la scarsa manutenzione e pulizia degli apparecchi e delle canalizzazioni possono aumentare la proliferazione dei contaminanti, che poi si diffondono nell'ambiente interno una volta attivati gli impianti di ventilazione meccanica. Dall'altra parte le persone emettono inquinanti in base all'attività fisica svolta e contribuiscono a peggiorare la qualità dell'aria interna. La ventilazione viene distinta quindi in:

- Ventilazione naturale: cioè viene realizzata tramite aperture sull'involucro edilizio. L'efficacia maggiore si ottiene se le aperture si trovano contrapposte, tuttavia non è controllabile né la portata né la qualità dell'aria proveniente dall'esterno. Ulteriori problematiche possono essere la rumorosità e la presenza di correnti d'aria fredda, solitamente viene immessa aria calda in estate ed aria fredda in inverno con conseguenti perdite di energia.
- Ventilazione meccanica: con questo tipo di ventilazione si ha il controllo sulla portata d'aria immessa e si evitano le correnti d'aria che possono essere causa di discomfort. La presenza di filtri ed il livello controllato di umidità provvedono ad incrementare la qualità dell'aria ed il comfort. Si ha inoltre la garanzia di continuità del processo

Quando si utilizzano solo forze naturali il sistema di ventilazione viene detto passivo. Quando si utilizzano anche sistemi meccanici il sistema di ventilazione è detto ibrido.

5.2 LA VENTILAZIONE NATURALE

I movimenti d'aria si originano per differenza di pressione o di temperatura tra due punti. Se in un edificio si collocano delle aperture, il differenziale di pressione tra le varie facciate innesca un flusso d'aria interno che può essere sfruttato per ventilare l'edificio. Le differenze di pressione sono dovute al vento, alla differenza di temperatura e di densità tra interno ed esterno. Gli effetti della ventilazione vengono valutati tramite modelli semplificati per riuscire a studiare i legami che si innescano tra assetti urbani e le variazioni dei parametri di ventilazione, nell'organizzazione degli edifici diversi sono i casi ricorrenti dovuti alla ventilazione:

- Effetto turbolenza: si genera quando un edificio è più alto di quelli che lo circondano, nella parte libera dell'edificio la pressione è maggiore rispetto alla parte bassa protetta da altri edifici. Le due pressioni differenti generano così turbolenze.
- Effetto tunnel: si genera quando le zone con pressione diversa comunicano tramite aperture disposte sulle pareti dell'edificio; il flusso d'aria aumenta la velocità e questo genera situazioni di discomfort.

- Effetto spigolo: si verifica agli spigoli delle facciate quando il vento passa da una zona all'altra a diversa pressione separate da un edificio. Da qui la formazione di correnti d'angolo che normalmente si estendono per una zona il cui raggio è uguale o minore alla larghezza dell'edificio.

Per il controllo della ventilazione si deve considerare principalmente la disposizione delle aperture in pianta ed in alzato, la distribuzione interna degli spazi e i dispositivi di chiusura e regolazione dei flussi d'aria. Ci sono alcune diverse situazioni che modificano la ventilazione:

- Una sola apertura, sul lato del sopravvento, non produce ventilazione
- Due aperture uguali consentono una buona ventilazione
- Aperture decentrate generano vortici interni
- Aperture asimmetriche su pareti opposte generano una grande ventilazione con conseguente raffrescamento

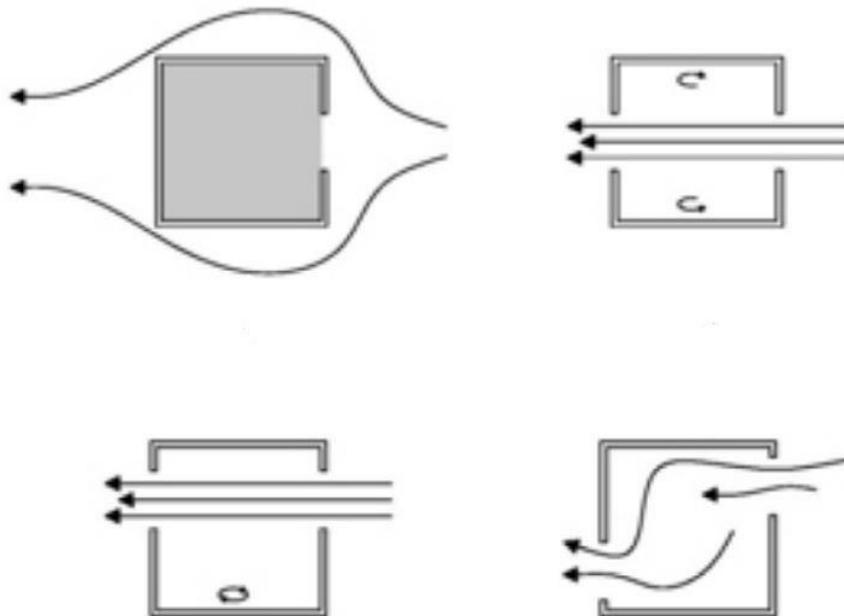


Figura 52. Tipi di Ventilazione

La ventilazione naturale può essere utilizzata anche per il raffrescamento degli ambienti interni, limitatamente alle condizioni climatiche esterne. In seguito vengono analizzati i possibili casi

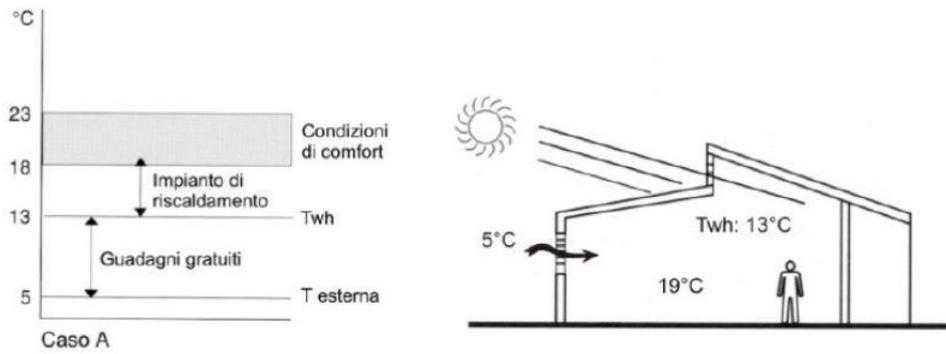


Figura 53. Caso Invernale

Nel caso di una situazione invernale all'interno supponiamo di avere una temperatura di 13°C, attivando gli impianti di riscaldamento la temperatura raggiunge i 19°C; se immettessimo aria esterna a 5°C il carico per gli impianti aumenterebbe, per questo è necessario ridurre al minimo l'aria di rinnovo.

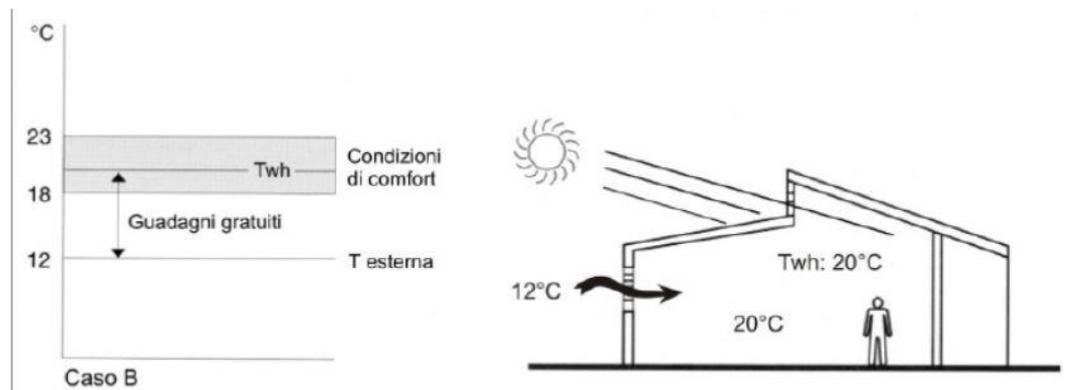


Figura 54. Caso Intermedio

Nel caso della stagione intermedia gli apporti solari consentono all'ambiente di raggiungere i 20 °C, per questo facendo entrare aria esterna andremo a raffreddare troppo l'ambiente, quindi anche in questo caso è necessario ridurre al minimo i ricambi d'aria

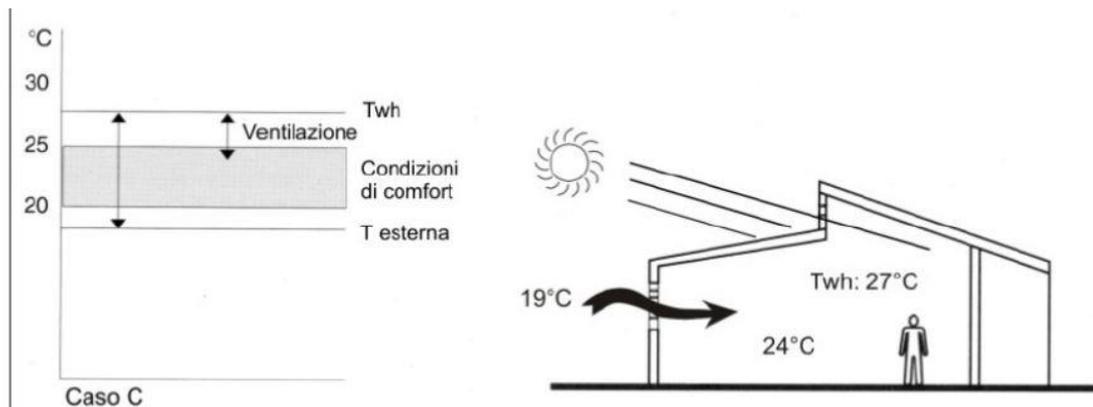


Figura 55. Caso Intermedio

Nella stagione intermedia però può anche verificarsi che gli apporti interni causino un incremento delle temperature interne che portano l'ambiente ad una temperatura maggiore rispetto a quello esterno, per questo in questa situazione è utile introdurre ari dall'esterno al fine di raffrescare senza l'ausilio degli impianti.

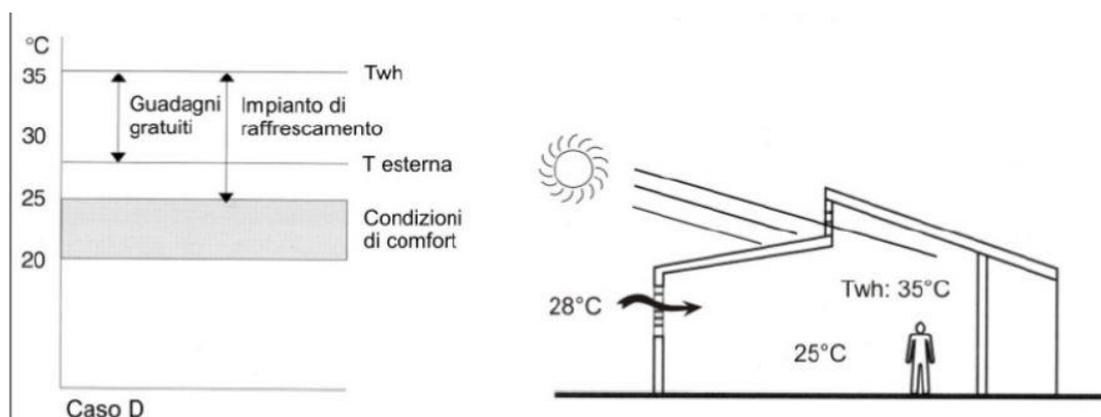


Figura 56. Caso Estivo

Infine nella stagione estiva la temperatura esterna è decisamente elevata rispetto a quella interna e non può essere utilizzata per raffrescare l'ambiente, la sua immissione comporta un eccesso di lavoro per i terminali di raffrescamento.

5.3 LA VENTILAZIONE IN ENERGYPLUS

La ventilazione in EnergyPlus si compone di due modelli. Il modello denominato "Design Flow Rate", ereditato dai programmi predecessori di EnergyPlus al quale si accede attraverso l'oggetto "ZoneVentilation:DesignFlowRate" e si basa sul fatto che le condizioni ambientali vadano a modificare la portata di ventilazione. Ed il secondo modello è denominato "Wind And Stack with Open Area" che si basa su equazioni definite nel capitolo 16 del manuale ASHRAE del 2009, al quale si accede mediante l'oggetto

“ZoneVentilation:WindAndStackOpenArea”. Dato che l’oggetto relativo al secondo modello richiede la differenza di altezza tra il punto mediano e quello più basso di apertura e la pressione neutrale (difficile da stimare) questo oggetto viene usato raramente. La ventilazione è il flusso d’aria principale proveniente dall’ambiente esterno diretto in una zona termica allo scopo di fornire un quantitativo di raffrescamento non meccanico. La ventilazione viene indicata dalla fase di input come un modello semplice in contrapposizione al modello più dettagliato che può essere creato tramite l’oggetto “AirFlowNetwork”. La ventilazione semplice in EnergyPlus può essere controllata da una schedule e attraverso la specifica di massimo, minimo e di differenze di temperatura. Le temperature possono essere rappresentate sia da valori costanti per tutto il periodo di simulazione sia da schedule con valori che variano durante tutto questo periodo. Il flusso di ventilazione può essere modificato dalle differenze di temperatura tra gli ambienti interno ed esterno e dalla velocità del vento. L’equazione di base utilizzata nel calcolo della ventilazione è la seguente:

$$Ventilation = (V_{design}) (F_{schedule}) [A + B |T_{zone} - T_{odb}| + C (WindSpeed) + D (WindSpeed^2)]$$

dove:

V_{design} = rappresenta la portata d’aria di ventilazione calcolata dal programma

$F_{schedule}$ = rappresenta il fattore inserito nella schedule per il quale la ventilazione verrà moltiplicata

T_{zone} = rappresenta la temperatura interna alla zona

T_{odb} = rappresenta la temperatura esterna a bulbo secco

WindSpeed = è la velocità del vento

A,B,C,D = sono dei fattori adimensionali che vengono utilizzati per correggere l’equazione che di default sono 1,0,0,0 questo permette di avere una portata di ventilazione costante in qualsiasi condizione

5.3.1 INSERIMENTO DATI DI VENTILAZIONE E CONFRONTI

Come già detto per inserire i dati relativi alla ventilazione in EnergyPlus si dovrà fare riferimento all’oggetto “ZoneVentilation:DesignFlowRate”

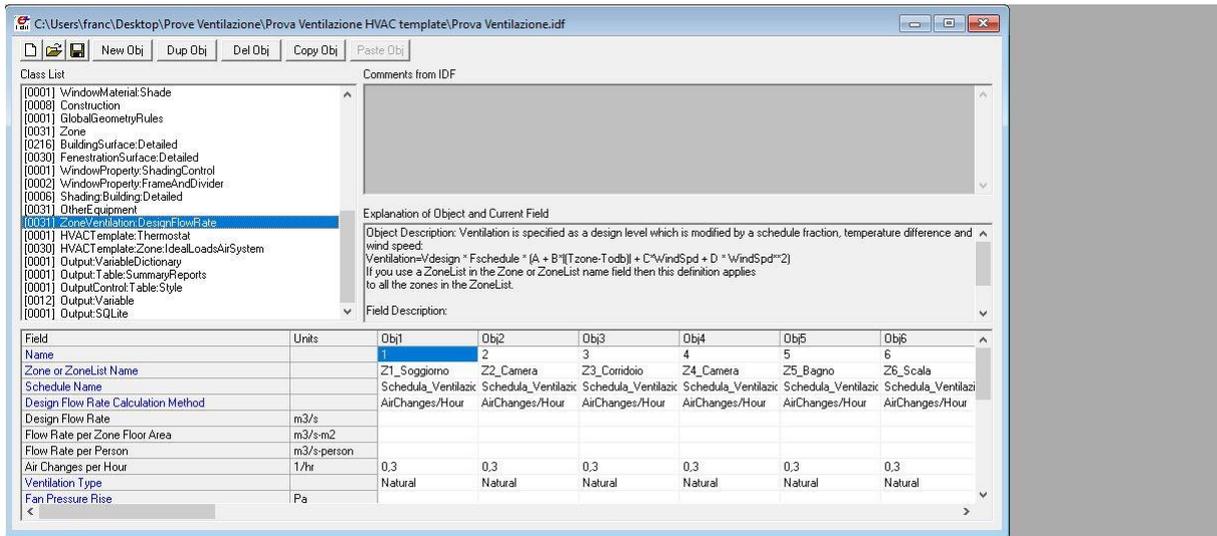


Figura 57. Inserimento dei Dati di Ventilazione

Per l'inserimento dei dati di ventilazione è stato creato un oggetto per ciascuna zona termica, nel quale la zona termica desiderata viene richiamata dalla riga "Zone or ZoneList Name". Poi si potrà inserire per ciascuna zona un oggetto relativo alla schedule che permetterà di avere una ventilazione costante o che varia durante le ore del giorno e i giorni dell'anno. La schedule sarà composta nella seguente forma:

Schedula_Ventilazic
Fraction
Through: 12/31
For: AllDays
Until: 24:00
1

Figura 58. Schedule Ventilazione

In questo caso è stato specificato un fattore 1 di moltiplicazione durante tutte le ore del giorno e durante tutti i giorni dell'anno. In questo modo verrà considerata sempre la presenza della ventilazione nelle zone termiche. Poi è stato selezionato il metodo di calcolo della portata di ventilazione, la selezione può essere svolta mediante quattro scelte:

- Portata/Zona

Con questa scelta il metodo utilizzato sarà un inserimento diretto della portata di ventilazione

- Portata/Area

Con questa scelta il metodo utilizzato sarà dato da un fattore moltiplicativo del rapporto portata di ventilazione/area

- Portata/Persone

Con questa scelta il metodo utilizzato sarà legato ad un fattore che moltiplica il numero di persone presenti nella zona

- Ricambi d'aria/Ora

Con questa scelta il metodo utilizzato sarà dato dal numero di ricambi orari per il quantitativo delle infiltrazioni. Questo fattore, insieme al volume della zona, verrà utilizzato per il calcolo della portata di ventilazione.

Il metodo che è stato preso in considerazione è quello dei ricambi d'aria orari inserendo il fattore di ricambi ora pari a 0,3 come specificato precedentemente. Poi il programma richiede che venga specificato se si tratta di ventilazione naturale o meccanica, in questo caso la ventilazione sarà naturale. Infine ci sono i fattori A,B,C,D della formula scritta precedentemente. Sul manuale di EnergyPlus non viene specificato un criterio di scelta di questi coefficienti per queste sono state fatte una serie di prove e si è giunto alla conclusione che per ottenere dei valori più veritieri possibili la scelta migliore è quella di lasciare i valori di default stabiliti da EnergyPlus e cioè 1,0,0,0. In questo modo (come si vedrà dal grafico seguente) si ottengono dei grafici confrontabili mentre con le altre prove venivano valori di ventilazione completamente sballati con valori anche 4 o 5 volte più alti di quelli proposti in seguito. Prima di lanciare la simulazione è importante selezionare le variabili di cui si ha bisogno.

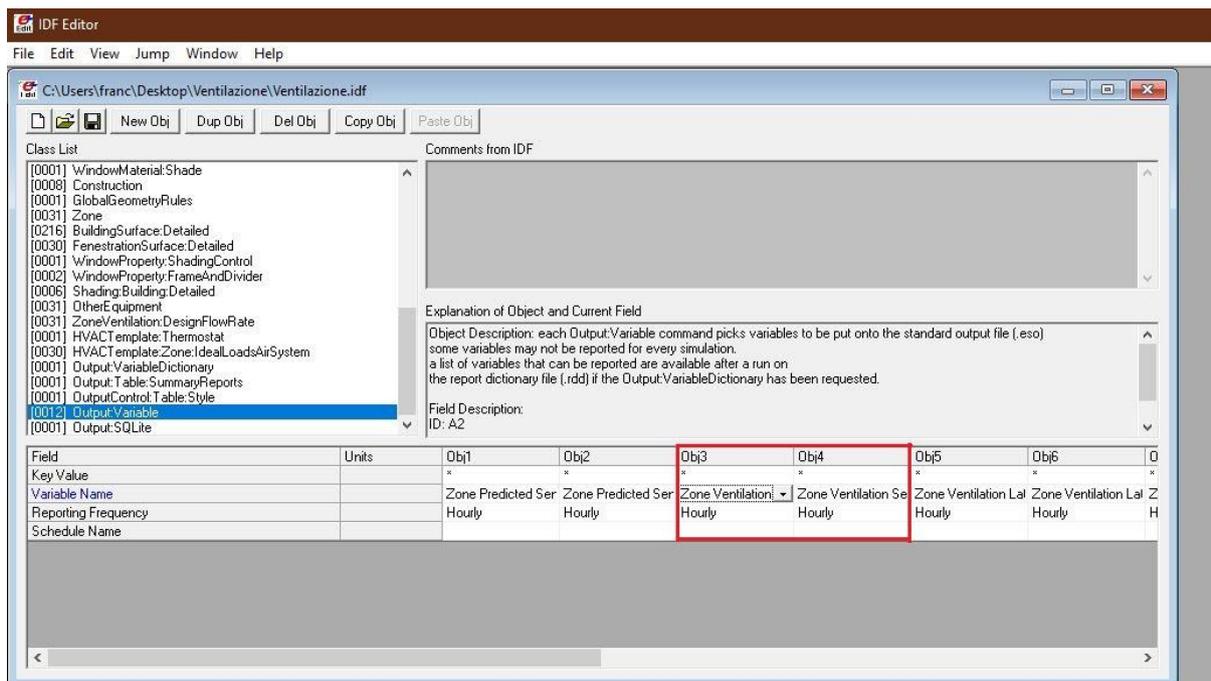


Figura 59. Selezione Variabili

Le variabili riguardanti la ventilazione vengono divise da EnergyPlus in 3 categorie. La totale che tiene conto sia degli apporti sensibili sia di quelli latenti, quella che tiene conto degli apporti solo sensibili, e quella che tiene conto degli apporti solo latenti. In questo caso si è scelta la variabile che riguarda gli apporti sensibili, questo perché non è previsto un controllo dell'umidità e quindi la presenza dei dati latenti potrebbe invalidare le prove. EnergyPlus prevede due variabili per quanto riguarda ciascuna delle tre categorie di output di ventilazione. In questo caso quelle scelte sono:

Zone Ventilation Sensible Heat Loss: che riguarda la perdita di calore sensibile che avviene quando la temperatura dell'aria di ventilazione entrante è minore rispetto alla temperatura interna alla zona (tipica condizione invernale).

Zone Ventilation Sensible Heat Gain: che riguarda il guadagno di calore sensibile che avviene quando la temperatura dell'aria di ventilazione in ingresso è maggiore o uguale della temperatura dell'aria interna alla zona (tipica situazione estiva).

Una volta selezionate le variabili si è proceduto con la simulazione che una volta importata in Excel ha fornito i seguenti risultati

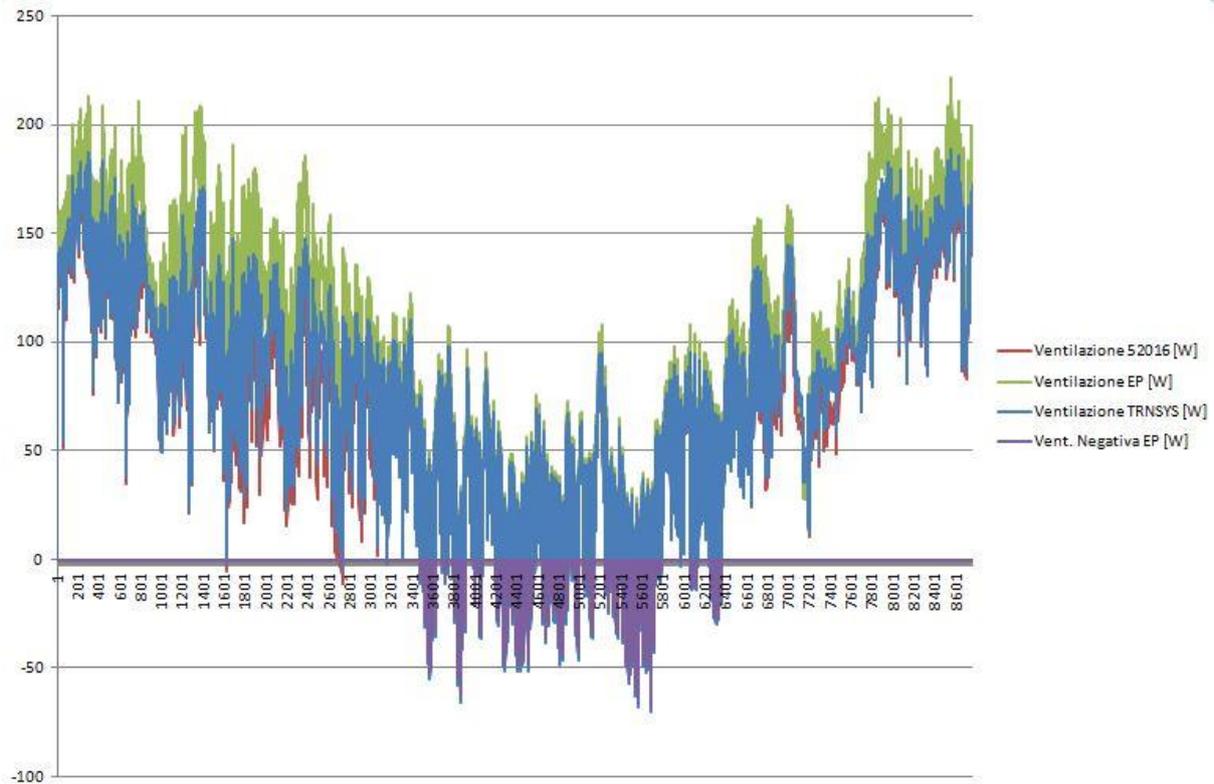


Figura 60. Grafico di Confronto Ventilazione

Come già spiegato EnergyPlus fornisce due variabili di output relative alla ventilazione, gli Heat Loss e gli Heat Gain, durante i suoi calcoli EnergyPlus non permette agli Heat Loss di avere valori negativi, quindi se questo si verifica pone automaticamente il valore zero, infatti come si può notare dal grafico gli Heat Gain (grafico verde) non scendono mai sotto lo zero, mentre gli Heat Gain sono sostanzialmente i complementari agli Heat Loss e cioè quei valori che si ottengono quando gli Heat Loss sono minori di zero (grafico viola). Come si può vedere dai grafici l'andamento degli stessi è sostanzialmente sovrapponibile specie nel periodo estivo. Nel periodo invernale EnergyPlus tende a mantenere comunque valori più alti (come si è anche già visto nella parte dei solar gains) rispetto agli altri due algoritmi di calcolo, ma comunque si può notare come i valori siano molto vicini. Nella situazione estiva invece i tre algoritmi sono praticamente allineati (come accade anche nei solar gains). Da tutte le prove effettuate abbiamo potuto notare come la situazione estiva venga valutata dal programma in maniera molto più vicina agli altri due algoritmi di calcolo, questo potrebbe essere dato probabilmente da una maggiore presenza dello shading, dovuta al fatto che il sole si trova in una posizione più alta rispetto all'inverno, che probabilmente il programma tende a tenere meno in considerazione durante la fase invernale.

6. I FABBISOGNI

6.1 GENERALITÀ

La prestazione energetica di un edificio esprime la quantità di energia stimata o effettivamente consumata per soddisfare i diversi bisogni (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, ecc.) connessi ad un uso standard dell'edificio. Le ipotesi che vengono fatte nel calcolo del bilancio energetico dell'edificio sono:

- Temperatura interna invernale 20°C
- Temperatura interna estiva 26°C

I dati climatici mensili sono definiti dalla UNI 10349, comprendenti le medie mensili delle temperature esterne, l'irradianza solare media mensile sia sul piano orizzontale che per ciascun orientamento. Definiamo il **fabbisogno netto di energia termica** come la quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo. Per **fabbisogno di energia primaria** si intende l'energia fornita ad un edificio da un impianto di riscaldamento/raffrescamento partendo dal fabbisogno netto dell'involucro e tenendo conto dei rendimenti dell'impianto scelto. La domanda annua di energia primaria, ovvero calcolata a monte delle conversioni operate dagli impianti degli edifici, è quella relativa alla climatizzazione invernale, alla climatizzazione estiva, alla produzione di acqua calda sanitaria e, con esclusione delle residenze utilizzate in modo continuativo, all'illuminazione artificiale. La domanda di energia termica relativa alla climatizzazione di un edificio viene stimata sulla base di un bilancio termico dell'ambiente delimitato dall'involucro edilizio. Questo bilancio termico è collegato ad un più generale bilancio energetico dell'edificio che contempla anche gli altri usi finali dell'energia. Dalla domanda di energia termica dell'ambiente confinato, sulla base della valutazione dei rendimenti dei sistemi impiantistici, si risale alla domanda di energia primaria. Nella prassi progettuale corrente si utilizzano bilanci semplificati, su base mensile, che possono essere eseguiti tramite fogli di calcolo automatici. Di questo tipo è il metodo contenuto nella norma europea EN ISO 13790:2008 "Energy performance of buildings- calculation of energy use for space heating and cooling" (sostituita dalla norma EN ISO 52016). Il metodo consente di tener conto delle variazioni temporali delle temperature interna ed esterna, dell'inerzia termica delle masse costituenti l'edificio e del regime di funzionamento dell'impianto (attenuazioni, intermittenza, interruzioni). La legislazione italiana fa riferimento alle normative europee attraverso le norme UNI che definiscono le modalità per la sua applicazione nazionale ai fini del calcolo del fabbisogno di energia primaria, relativo alla climatizzazione estiva ed invernale degli edifici. Per la valutazione delle prestazioni energetiche estive dell'edificio la nostra legislazione prevede anche in alcuni casi, in alternativa al calcolo del fabbisogno energetico per la climatizzazione, il calcolo di alcuni parametri caratterizzanti l'involucro. In ogni caso la normativa italiana consente e consiglia l'uso di metodi di calcolo più dettagliati qualora si

disponga dei dati climatici necessari, ovvero su base oraria anziché mensile. Un bilancio termico dettagliato richiede la definizione di intervalli temporali sufficientemente piccoli (orari o sub-orari) e la scomposizione dell'edificio in parti omogenee per proprietà termofisiche (materiali) e condizioni al contorno (quali l'irraggiamento solare), parti di dimensioni più o meno grandi a seconda del grado di dettaglio richiesto. Per ognuna delle parti va scritta un'equazione di bilancio termico in cui compaiono i flussi scambiati in vario modo con le altre parti e la variazione di energia interna dalla parte cui è riferita l'equazione. L'insieme di queste equazioni fornisce un sistema la cui soluzione fornisce valori delle temperature e dei flussi termici non noti. Tra i flussi non noti è compreso quello che l'impianto deve fornire all'ambiente confinato per mantenere la temperatura interna desiderata. Il calcolo va ripetuto per ogni intervallo temporale in cui è stato suddiviso il periodo di studio. Per i calcoli si prende in considerazione l'intero edificio o una zona di esso (chiamata zona termica), di dimensioni non inferiori al vano, omogenea per temperatura interna e condizioni al contorno e servita da uno stesso impianto.

6.1 I FABBISOGNI IN ENERGYPLUS

Per quanto riguarda il calcolo dei fabbisogni in EnergyPlus dovranno essere inseriti gli oggetti relativi alle condizioni che devono essere mantenute all'interno delle zone termiche. Questi oggetti si trovano nella voce "HVACTemplate". Questo gruppo di oggetti permette di specificare semplici termostati o impianti di condizionamento che generano automaticamente i nodi e procedono ai calcoli impostando delle semplici condizioni di base.

- HVACTemplate:Thermostat
 - HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem
- For baseboard heating systems with optional hot water boiler:
- HVACTemplate:Thermostat
 - HVACTemplate:Zone:BaseboardHeat
 - HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop (optional)
 - HVACTemplate:Plant:Boiler (optional)
- For fan coil systems with boilers and chillers:
- HVACTemplate:Thermostat
 - HVACTemplate:Zone:FanCoil
 - HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop
 - HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop
 - HVACTemplate:Plant:Chiller
 - HVACTemplate:Plant:Boiler
 - HVACTemplate:Plant:Tower

Figura 61. Diversi tipi di Inserimento del Template

Nell'immagine sopra sono presenti solo alcuni dei templates disponibili, a seconda del grado di dettaglio che si vuole raggiungere nella rappresentazione dell'impianto disponibile all'interno dell'edificio; in questo caso è stata scelta la soluzione più semplice e cioè quella che consiste nel mantenere la temperatura delle zone termiche tra un setpoint estivo ed uno invernale, per questo si utilizzeranno i primi due oggetti e cioè: "HVACTemplate:Thermostat" e "HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem" questi due oggetti permetteranno di creare un semplice sistema di carichi ideali che permetterà di passare al calcolo dei fabbisogni. Il primo degli oggetti che viene preso in considerazione è quello di "HVACTemplate:Thermostat".

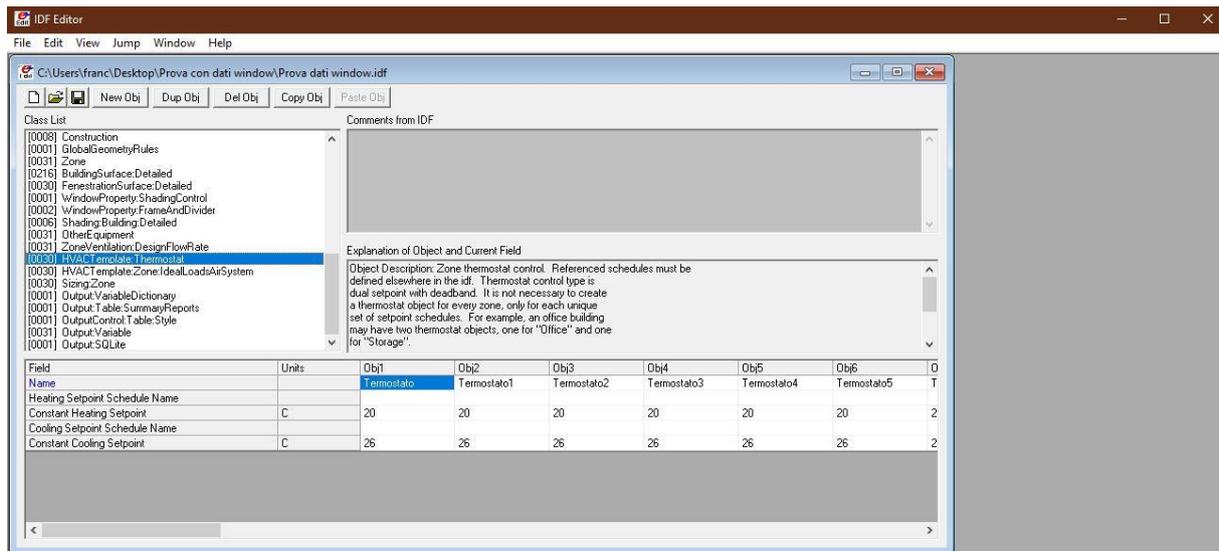


Figura 62. Inserimento SetPoint Termostato

Per ogni zona termica dovrà essere creato un singolo oggetto che sarà richiamato per ciascuna di quelle zone. Questo tipo di oggetto permette di fornire al sistema un setpoint estivo e invernale che può essere tenuto costante per tutto il periodo di simulazione, oppure che può variare a seconda di una schedule. Per questo caso di studio è stato scelto un setpoint fisso durante tutto l'anno impostato a 20°C per il riscaldamento in fase invernale e a 26°C per il condizionamento in fase estiva. Il tipo di controllo del termostato è un controllo a doppio setpoint con dead band. Quindi gli unici dati che vanno inseriti in questo tipo di oggetto sono il nome che servirà a riferirlo a ciascuna zona termica ed il setpoint (o l'eventuale schedule). Una volta impostati questi dati bisogna inserire quelli relativi al "HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem".

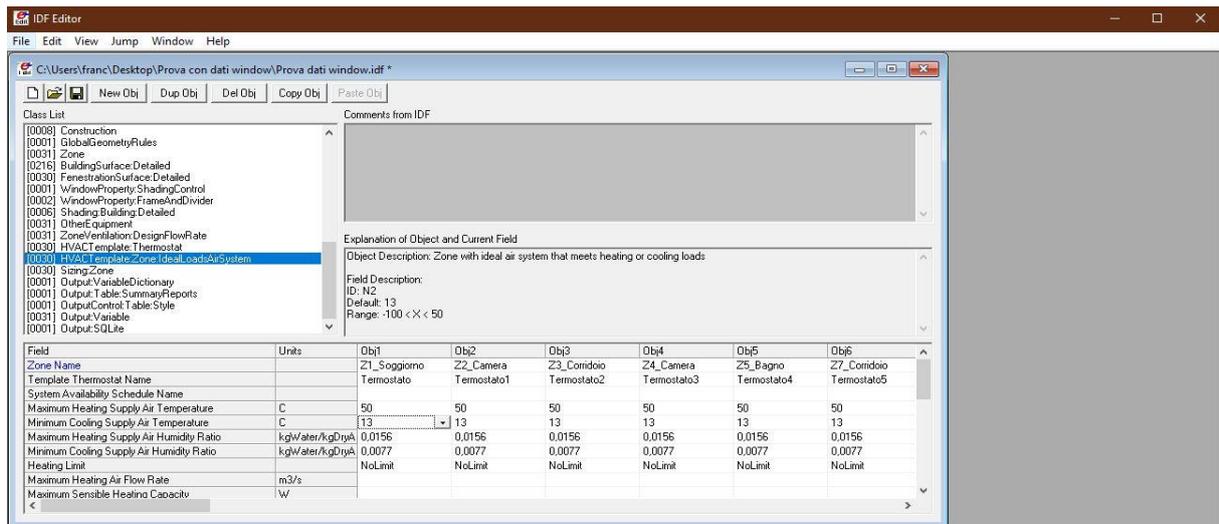


Figura 63. Inserimento del Sistema di Carichi Ideale

Questo oggetto fornisce un sistema ideale per portare aria condizionata alla zona per arrivare ai dati di setpoint. Viene utilizzato per il calcolo dei carichi all'interno di un edificio o come primo passo per una valutazione più realistica dei carichi. Questo sistema può essere utilizzato con una capacità di riscaldamento/raffrescamento infinita oppure che può essere comandata attraverso una schedule; schedule che può essere utilizzata anche per ottenere periodi di accensione/spengimento. Ci sono anche controlli opzionali per quanto riguarda l'umidificazione, la deumidificazione, gli economizzatori o il recupero di calore. Questo componente può essere considerato come un'unità ideale che miscela l'aria alle condizioni di scarico della zona con lo specifico quantitativo di aria esterna e poi aggiunge o rimuove calore e umidità al 100% di efficienza al fine di produrre un flusso d'aria di mandata con le condizioni specificate. In questo oggetto va inserito il nome della zona alla quale verrà accoppiato questo sistema, poi bisogna richiamare il termostato spiegato nell'oggetto precedente (un termostato diverso per ciascuna zona termica) poi ci sono i dati relativi alle massime temperature dell'aria di mandata per il riscaldamento e per il raffrescamento, per le quali sono stati scelti i dati di default e cioè 50°C per il riscaldamento e 13°C per il raffrescamento. Infine gli ultimi dati che sono stati impostati sono i limiti di potenza per quanto riguarda il riscaldamento ed il raffrescamento. Dato che lo scopo è quello di calcolare i fabbisogni necessari a garantire le condizioni di temperatura interna all'interno delle zone termiche si è deciso di impostare questi valori su NoLimit, in questo modo il programma non darà limiti di potenza ed il sistema riuscirà sempre a portare a setpoint le varie zone termiche. Infine prima di procedere con la simulazione bisogna decidere quali sono le variabili che interessano l'attuale prova:

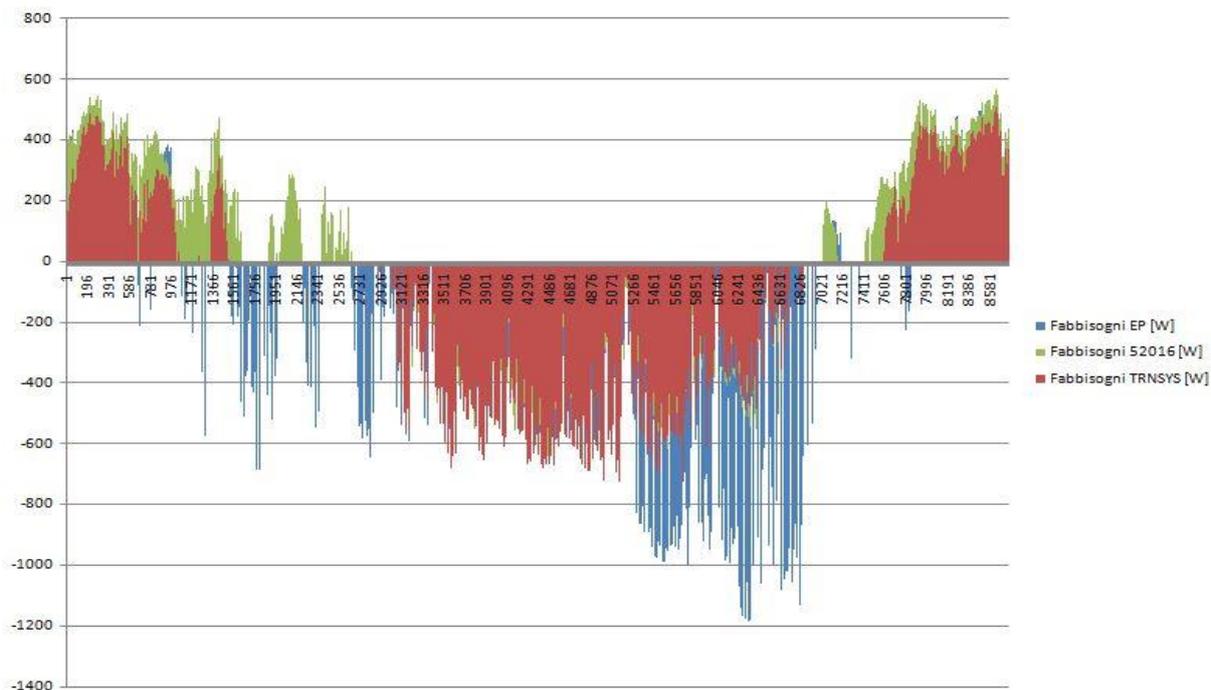


Figura 65. Confronto dei Fabbisogni

Come si può notare dal grafico nella parte invernale i tre algoritmi sono quasi allineati, tuttavia EnergyPlus ha dei punti di raffrescamento in zone dove non dovrebbero essere, nella zona estiva poi EnergyPlus arriva ad una sovrastima piuttosto elevata dei fabbisogni. Si sono posti gli interrogativi su cosa potesse causare questo sfasamento allora si è passato a valutare le temperature operanti della zona termica presa in considerazione ed il seguente grafico evidenzia le differenze che sono emerse:

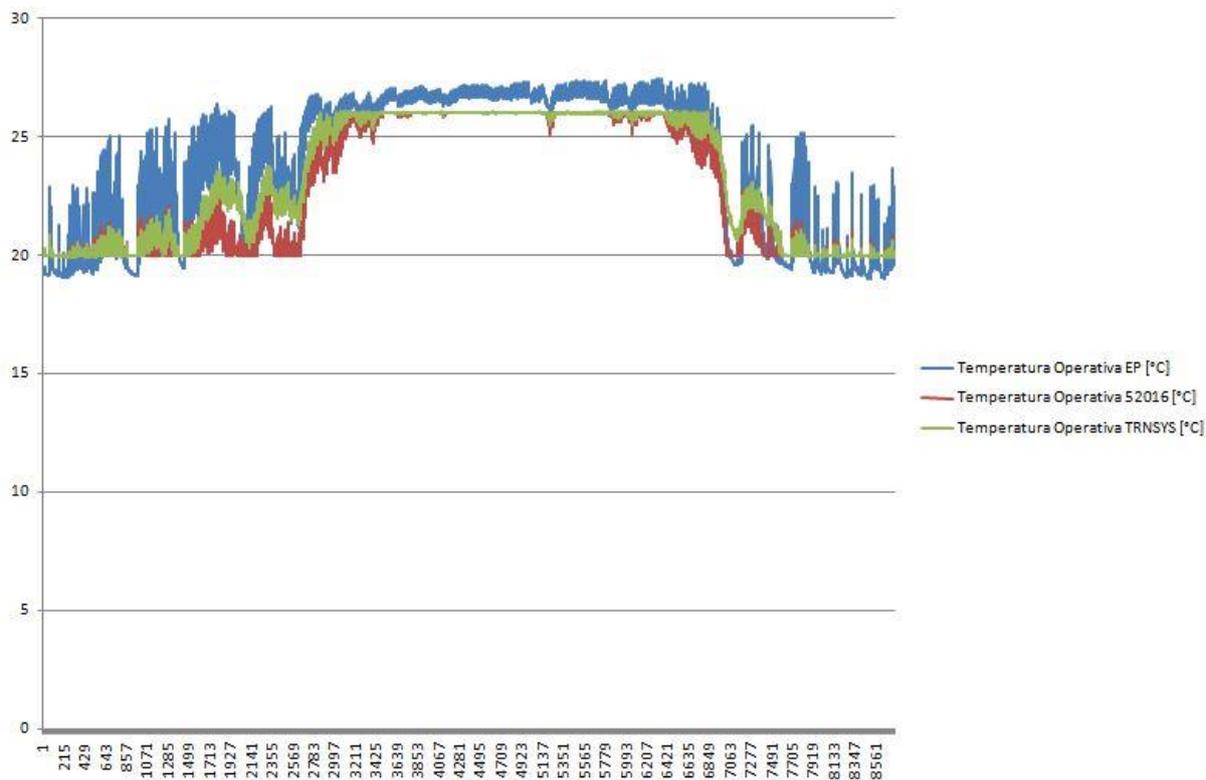


Figura 66. Confronto delle Temperature Operative

Come si può facilmente notare le temperature ottenute con EnergyPlus in inverno solo molto più alte rispetto a quelle degli altri algoritmi ed in alcune situazioni salgono anche sopra i 26°C e questo causa quei fenomeni anomali di raffrescamento in fase invernale, inoltre in fase estiva si può notare come la temperatura di EnergyPlus sia molto più alta rispetto a quella degli altri algoritmi e questo è il fattore che causa l'eccessiva potenza di raffrescamento necessaria in fase estiva che è stata vista nel grafico prima. Inoltre il grafico viene falsato dal fatto che gli altri due algoritmi riescono ad avere il controllo della temperatura sulla temperatura operativa mentre EnergyPlus ce l'ha su quella dell'aria interna. Sono state svolte una serie di prove atte a spostare su EnergyPlus il controllo sulla temperatura operative ma nessuna di queste ha avuto successo. Avendo allineato gli apporti solari e quelli di ventilazione, si sono analizzate le temperature superficiali delle strutture opache e vetrate della zona termica considerata, di seguito vengono riportati i grafici delle temperature superficiali delle finestre posizionate rispettivamente ad est e a sud:

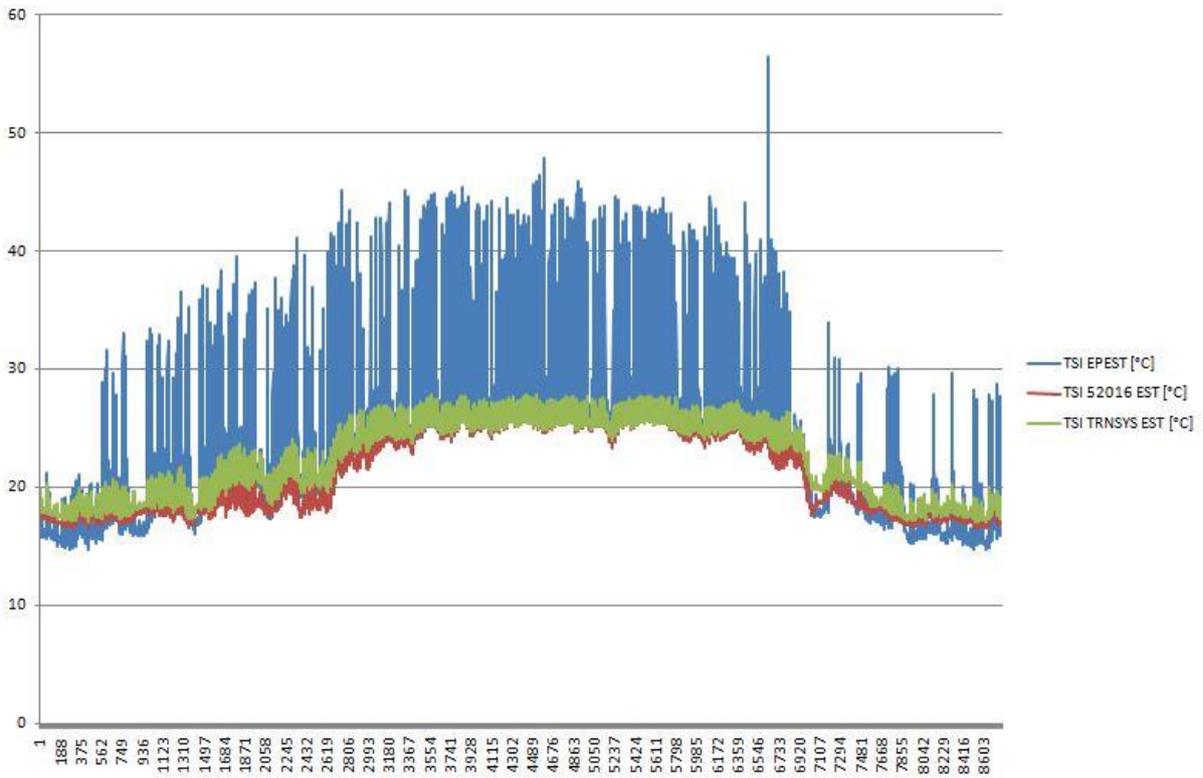


Figura 67. Confronto Temperature Superficiali Interne Finestra Est

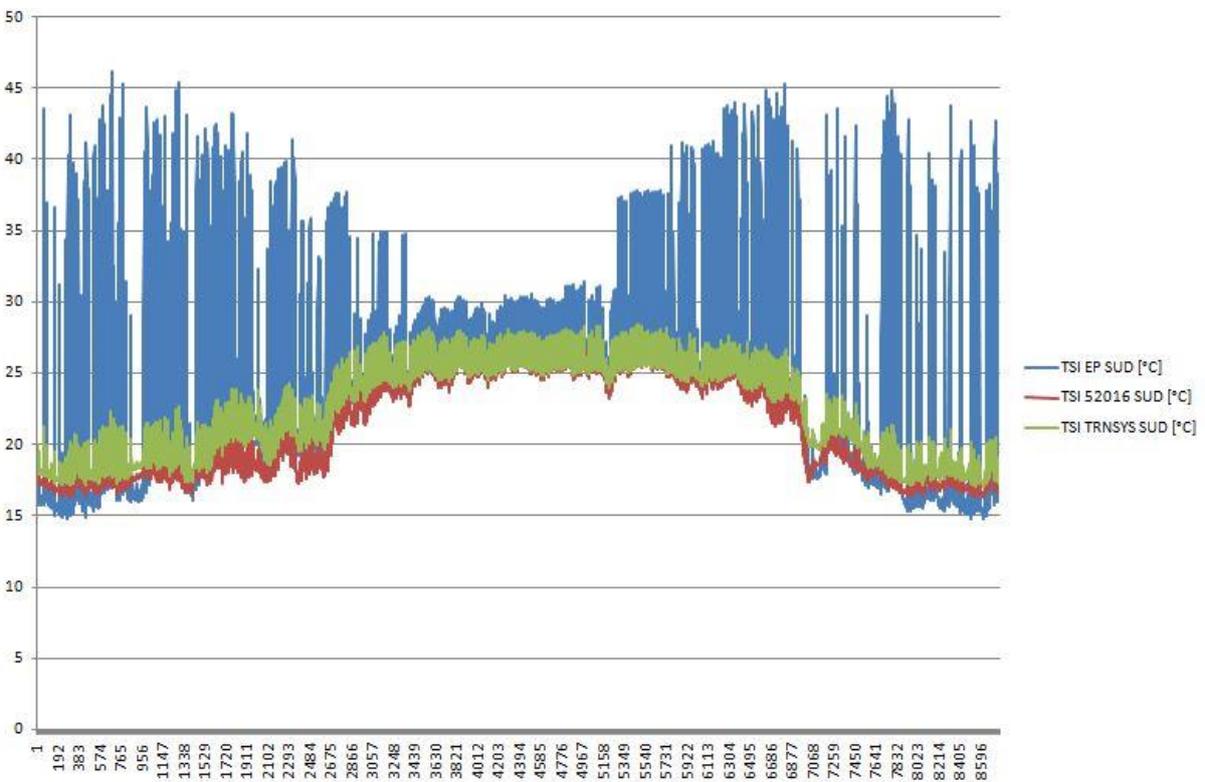


Figura 68. Confronto Temperature Superficiali Interne Finestra Sud

Come si può notare EnergyPlus fa raggiungere alle finestre delle temperature troppo elevate sia nella direzione est che nella direzione sud, inoltre anche l'andamento è molto simile a quello delle radiazioni globali analizzate nel secondo capitolo. Dai risultati ottenuti nel capitolo 4 relativi agli apporti solari, si può escludere che il problema derivi dall'errata modellazione dei sistemi schermanti, pertanto si è proseguita l'analisi analizzando la radiazione assorbita dalle finestre. Infine l'ultimo confronto che è stato svolto è quello relativo alla radiazione assorbita dalle finestre. Di seguito vengono riportati i grafici dell'assorbimento della finestra ad est e a sud della zona termica considerata.

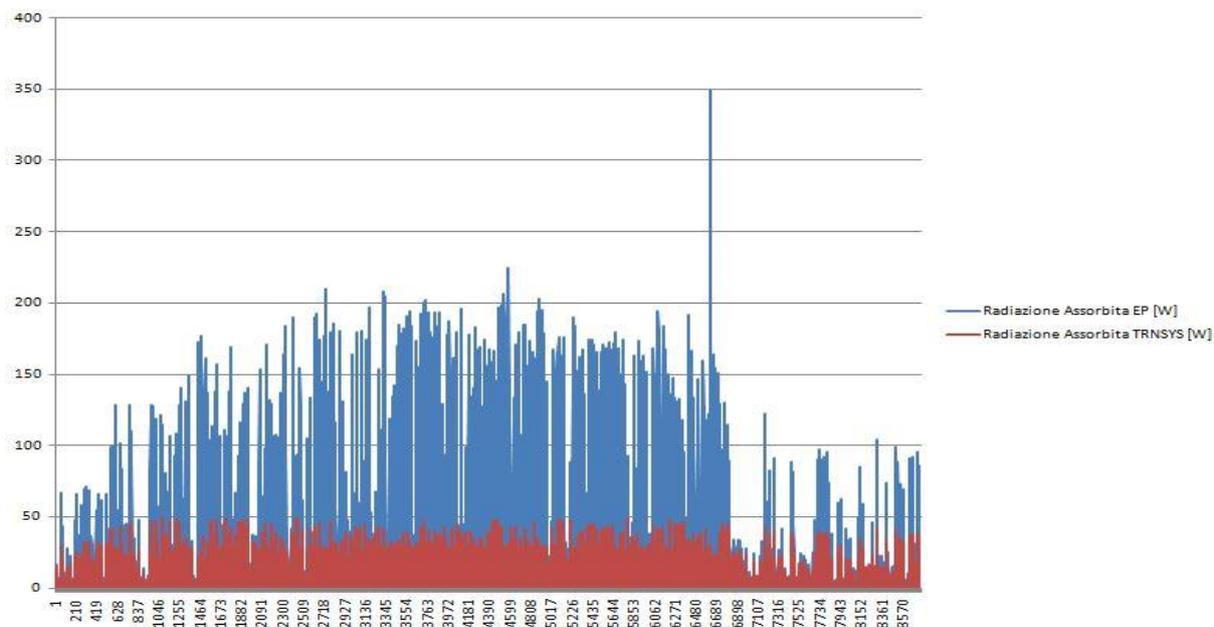


Figura 69. Confronto Radiazione Assorbita Finestra Est

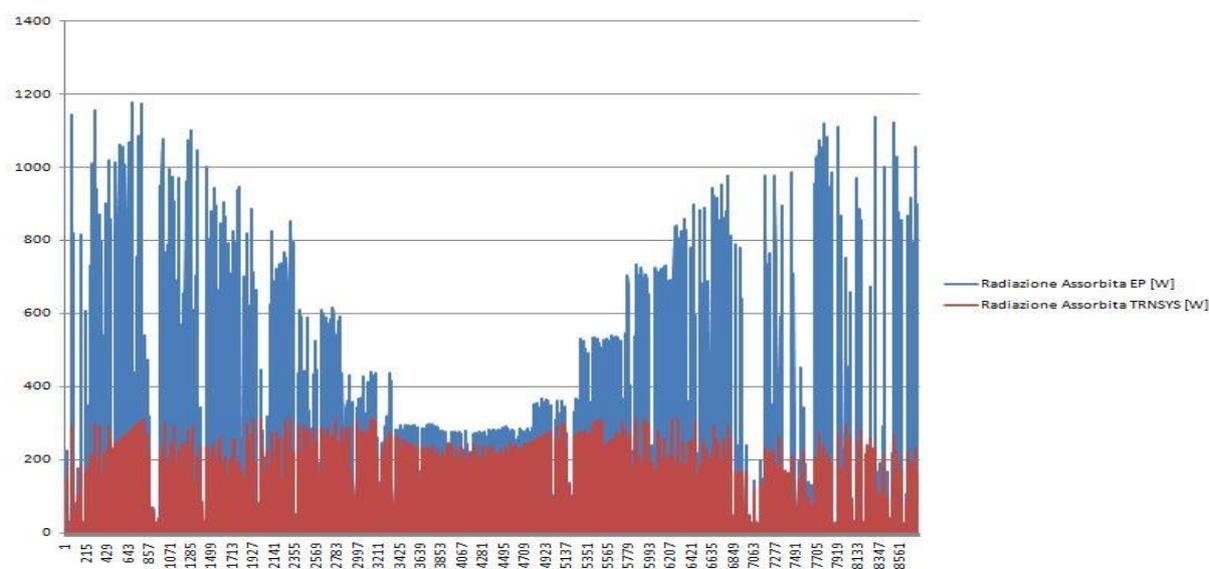


Figura 70. Confronto Radiazione Assorbita Finestra Sud

Come si può notare l'assorbimento della radiazione di EnergyPlus è esageratamente più alto di quello di TRNSYS, inoltre ha un andamento completamente diverso. L'andamento di EnergyPlus è lo stesso della radiazione globale incidente mentre quello di TRNSYS è un andamento più lineare. Questo denota come sicuramente EnergyPlus tiene conto qualche fattore in maniera diversa rispetto a TRNSYS. Si è poi inserito in EnergyPlus il file relativo alle finestre generato direttamente da WINDOW in modo da ottenere gli stessi dati di input utilizzati per TRNSYS, questo però non ha portato ad una risoluzione del problema, dai risultati ottenuti si capisce che il problema derivi necessariamente dal trattamento del vetro da parte del software, che sfrutta parametri differenti specialmente nel trattare l'assorbimento della radiazione, ed è questo che causa il problema delle temperature elevate (e di conseguenza di fabbisogni elevati) riscontrato in questo capitolo.

7. CONCLUSIONI

L'utilizzo di programmi per la simulazione dinamica degli edifici è qualcosa di molto importante ed utile, che può permettere di tenere in considerazione una ampia gamma di situazioni che possono andarsi a creare a causa di un enorme numero di variabili. Permette di tenere in conto una quantità di parametri elevatissima andando ad agire anche su elementi apparentemente insignificanti. Permette di arrivare ad un livello di dettaglio molto elevato e di avere stime più veritiere rispetto a quelle ottenute con i tradizionali calcoli che adottano la semplificazione del regime stazionario (essendo che in questo modo abbiamo a disposizione dati orari o addirittura sub-orari). Questo indica che il livello di precisione del programma richiede un quantitativo di input difficilmente gestibili che possono portare facilmente ad errore. Pur avendo allineato i carichi climatici, i carichi solari, quelli per ventilazione e gli apporti interni; le temperature superficiali, dell'aria e i fabbisogni delle zone termiche risultano essere più alti rispetto a quelle di TRNSYS. Il problema potrebbe risiedere o nella trasmissione dell'onda termica delle strutture opache o nell'assorbimento della radiazione solare delle superfici vetrate. Questa tesi sarà punto di partenza per sviluppi futuri.

BIBLIOGRAFIA

Arasteh, D., J.C. Kohler, B. Griffith, *Modeling Windows in EnergyPlus with Simple Performance Indices*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009

DeFalco F., *Il Ruolo delle Schermature Solari nel Bilancio Energetico del Sistema Edificio-Impianto*, Università degli studi Federico II, Napoli

European parliament and concil. *Directive 2010/31 EU Recast on energy performance on buildings*. Official Journal of the european union.

Pacchiega C., *Simulazione Termo-Energetice Dinamica di Edifici ad Elevate Prestazioni: Procedure di Validazione dei modelli, Applicazioni Progettuali e Casi Studio*, Università degli Studi di Ferrara, 2014

Ricciu R., *Progettazione Tecnica e Strutturale, Modulo Impianti, La Ventilazione*, Università degli studi di Cagliari, 2013

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

U.S. DOE. *EnergyPlus Input and Output Reference*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, United State

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

www.bigladdersoftware.com

www.energyplus.net

www.windows.lbl.gov

RINGRAZIAMENTI

È sempre difficile scrivere dei ringraziamenti ma vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

Ringrazio il mio relatore, Professor Costanzo Di Perna, per avermi dato la possibilità di realizzare questo lavoro, e per avermi seguito durante questo percorso.

Ringrazio l'Ing. Serena Summa per la competenza con cui mi ha indirizzato nelle occasioni di dubbio e per la pazienza che ha dimostrato nei miei confronti durante la stesura di questa tesi.

Ringrazio di cuore la mia famiglia, le colonne portanti della mia vita, non solo per il sostegno materiale ma per avermi sempre sostenuto e per avermi permesso di portare a termine gli studi universitari.

Ringrazio Fabiana, la mia coinquilina, ma soprattutto la mia più grande amica, che mi ha sempre sostenuto, nonostante il mio caratteraccio nei momenti di tensione e di stress, mi è sempre stata vicina, mi ha sempre fatto capire quanto valgo e mi ha sempre risollevato dopo ogni delusione, sempre pronta ad aiutarmi in ogni situazione, è riuscita a portare gioia e spensieratezza anche nei momenti in cui il mondo mi crollava addosso, non so come avrei fatto senza di lei.

Ringrazio Alessandro, il mio coinquilino che c'è sempre stato a ricordarmi quanto la fine di questo percorso fosse vicina e che è riuscito ad aiutarmi sempre nei periodi più difficili, grazie per aver ascoltato i miei sfoghi e per essere stato mio amico anche quando avresti voluto strozzarmi.

Ringrazio Enrico, per tutto il supporto che mi ha dato, per i mille giri in scooter sotto la pioggia e per le giornate passate a sbattere la testa su Dymola, e grazie perché senza spronarci a vicenda nei nostri ultimi esami avrebbero rasentato la pazzia.

Ringrazio Alberta e Lara, che con la loro follia e le loro canzoni hanno reso il periodo degli esami addirittura piacevole, nonostante le consegne di progetti alle 3 di notte per modificare le ultime linee.

Ringrazio Piero e Suada con i quali ho condiviso la stesura della tesi e l'ansia della porta chiusa, grazie perché avete contribuito a rendere migliori le mie giornate in questo lungo periodo.

Infine ringrazio me stesso, per non aver mai mollato, con la mia tenacia e determinazione sono riuscito a superare esami che reputavo impossibili ed a conseguire un titolo di cui non pensavo di essere all'altezza.