

POLITECNICO DI TORINO

COLLEGIO DI INGEGNERIA ENERGETICA

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica
e Nucleare**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Analisi della generazione
fotovoltaica e termo-energetica di un
edificio ad alta efficienza energetica**



Relatori

PROF. FILIPPO SPERTINO

PROF. ENRICO FABRIZIO

Candidato

TOMMASO GASCO

s239982

DICEMBRE 2018

Ringraziamenti

Probabilmente sarò un po' prolisso con i ringraziamenti, ma desidero dedicare un pensiero personale a tutte le persone che mi hanno accompagnato durante questo lungo e faticoso percorso.

Il primo ringraziamento lo rivolgo al mio relatore Prof. Filippo Spertino per essere stato una figura seria e professionale, un esempio eccellente di professore per la dedizione al suo lavoro e per avermi accompagnato passo passo nella stesura della tesi. Lo ringrazio per la pazienza che ha avuto nel correggere tutti gli errori con l'obiettivo di rendere il mio lavoro di tesi degno di nota.

Il secondo ringraziamento lo dedico al mio secondo relatore, il professore Enrico Fabrizio, che ringrazio per l'enorme pazienza che ha avuto nell'accogliere uno studente di Innovazione che si ricordava ben poco della parte termotecnica. Lo ringrazio veramente molto per avermi proposto i temi trattati e per avermi offerto la possibilità di poterci ragionare sopra in modo da approfondire le mie conoscenze dove erano più scarse.

Vorrei ringraziare anche tutte le persone coinvolte nel progetto PVZEN. In particolare un enorme ringraziamento va a Stefania che è sempre stata disponibile a fornirmi spiegazioni, dettagli, consulenza ma anche solo conforto quando ancora si brancolava nel buio. Grazie anche a Nicolò che mi ha sempre offerto sostegno morale ed è sempre riuscito a strapparmi una risata.

Desidero ringraziare enormemente i miei genitori non per avermi supportato, ma sopportato durante questi lunghi cinque anni. Non è stato facile per me, ma non lo è stato neanche per loro che hanno dovuto sopportare i miei momenti di crisi più nera. Ringrazio mia madre per avermi sempre ascoltato, per avere sempre creduto in me e per avermi sempre spronato a dare il meglio. La ringrazio per l'amore incondizionato che prova per me che mi spinge sempre a migliorarmi e ad essere una persona migliore. Sono avaro di complimenti nei tuoi confronti, ma la stima e l'amore che provo per te sono infiniti. Ringrazio mio padre per avere letto tutto il mio lavoro di tesi e non essersi annoiato, per avermi spronato il primo anno in un momento di grande difficoltà; lo ringrazio per aver sempre creduto in me e lo ringrazio di ammirarmi come solo un genitore fiero può fare. L'immagine che ho di te è mentre stai in piedi alle mie spalle con la faccia sbalata cercando di capire quello che sto facendo.

Sono fortunato perché oltre a due genitori ho anche un patrigno e una matrigna che mi amano come fossi figlio loro. Ringrazio Beppe per la sua bontà intrinseca, per farmi sempre ridere e per essere il patrigno migliore che potessi desiderare. Ringrazio la mia matrigna Antonella per essere stata una seconda mamma, per essere fiera ed orgogliosa di me come fossi suo figlio e soprattutto la ringrazio per avermi dato il sostentamento necessario durante i numerosi cali di zucchero.

Ringrazio adesso i miei amici di una vita. Ringrazio Alberto per essere l'amico ideale che tutti vorrebbero avere, lo ringrazio per essermi stato accanto in questi mesi bui e per essere stato la mia luce di riferimento; abbiamo avuto molti momenti negativi, ma tu hai un amico in me, più di un amico in me, grazie davvero, sei come un fratello. Ringrazio Urmila per essere la sorellina che non ho mai avuto, la ringrazio per l'ammirazione e la stima immensi che prova per me che sono sempre stati combustibile per dare il meglio, la ringrazio per avermi sostenuto in questi ultimi mesi e nel corso di questi anni e la ringrazio per preoccuparsi sempre del mio bene come solo una sorella sa fare. Abbiamo avuto molto da discutere ma sono contento di averti ritrovato. Ringrazio Alessandro per essere l'amico perfetto, intelligente, buono, comprensivo e paziente con un testone come

me; lo ringrazio perché senza i suoi aiuti non ce l'avrei mai fatta a laurearmi: in molte occasioni è stato il mio punto di riferimento fisso, grazie davvero, sei una persona speciale. Ringrazio Francesca per essere un'amica molto speciale, la mia confidente preferita con cui scambiare ore di messaggi e di audiolibri, ti ringrazio per avermi supportato durante tutta la stesura della tesi e per avere sempre una buona parola per me, dipingendomi meglio di quello che sono e cercando sempre di vedere solo i miei lati positivi, grazie. Ringrazio Andrea per essere stato sempre presente da dieci anni a questa parte. Se devo pensare ad un amico su cui poter contare sempre, dovunque e comunque, sicuramente penso a te. Ringrazio Mattia che da poco è entrato nella mia vita ma ha avuto un impatto notevole; lo ringrazio per mettermi sempre in discussione con l'obiettivo di farmi crescere e migliorare, grazie, sei davvero una persona unica, sai che saresti il primo compagno della mia ciurma, se dovessi partire a cercare lo One Piece. Ringrazio Fulvia per avermi seguito in tutto questo percorso di tesi, interessandosi sinceramente e guardando con ammirazione i miei risultati e grazie soprattutto per la tua simpatia contagiosa, sei la prima persona che cercherei per festeggiare.

Ringrazio tutti i miei amici del mare Davide, Margherita, Sara, Silvia, Francesca, Stefano, Irene, Francesco, Giulia e Lorenzo per le estati indimenticabili passate insieme che rimarranno sempre scolpite nei miei ricordi. Un ringraziamento a speciale al gruppo Lisbona per tutte le risate che ci siamo fatti e per la bellissima esperienza.

Ringrazio i miei compagni di Politecnico che hanno condiviso con me tutto il percorso: ringrazio Daniele per riuscire sempre a strapparmi un sorriso in qualsiasi circostanza e per avere sempre un consiglio buono da darmi; ringrazio Emanuele (Manu) per essermi stato vicino in questo mese di stesura della tesi e per avermi risolto molti grattacapi, oltre a fornirmi consiglio continuo e ad avermi fatto vedere le cose sotto un'ottica diversa; ringrazio Flavio per la spontanea simpatia, per tutte le partite di briscola ed Uno e per essere stato uno stimolo continuo a migliorarmi. Ringrazio Paolo per essere stato la mia ancora di salvezza il primo anno di Magistrale quando mi sentivo troppo carico di responsabilità. Ringrazio Davide e Umberto per essere delle persone molto competenti con cui è piacevole discorrere di tutto, dagli argomenti più seri a quelli più frivoli, mi mancheranno le pause pranzo insieme.

Infine ringrazio la persona più importante che purtroppo non è qui a festeggiare con me: mio nonno, l'ingegnere Giangiuseppe Oliosì. Ti ho conosciuto poco, ma quel poco mi è bastato per capire la bella persona che sei stata; sapere che anche tu eri ingegnere, mi ha dato uno stimolo in più nel realizzarmi. Grazie, questa tesi e questo percorso sono anche merito tuo.

Indice

Introduzione	3
1 Il concetto di Edificio a Zero Energia	5
1.1 Definizione	5
1.2 Inquadramento legislativo	6
1.3 Layout generico	8
1.4 Esempi di Zero Energy Building	10
1.4.1 NIST Test House	10
1.4.2 Il quartiere BedZED	11
1.4.3 Il modulo abitativo PUR-E-House	12
1.4.4 Il modulo abitativo Biosphera 2.0	13
2 Riferimenti teorici	15
2.1 Termofisica dell'involucro edilizio	15
2.1.1 Proprietà termofisiche dei materiali	16
2.1.2 Metodi di isolamento dell'edificio	18
2.1.3 Inerzia termica dell'edificio	19
2.1.4 Bilancio di energia sull'edificio	20
2.2 Generazione fotovoltaica dell'energia	23
2.2.1 Struttura e funzionamento della cella solare	24
2.2.2 Il circuito equivalente della cella solare	25
2.2.3 La curva caratteristica	26
2.2.4 Definizione dei concetti di Autoconsumo e di Autosufficienza	28
3 Il modulo abitativo <i>Eco-home</i>	31
3.1 Descrizione del progetto <i>be-eco</i>	31
3.2 Struttura del modulo	32
3.2.1 Stratigrafia del modulo abitativo aggiornata	33
3.2.2 La tecnologia Naturwall	36
3.3 Posizionamento del modulo	38
4 Metodologia	39
4.1 Modellazione del modulo	39
4.2 Modellazione degli ostacoli e dell'ombreggiamento	40
4.3 Simuazione termo-energetica	42
4.3.1 Il file meteo e il concetto di anno tipo	42
4.3.2 Definizione delle Schedules	44
4.3.3 Implementazione dei dati di Input	45
4.3.4 Definizione del controllo termostatico e del sistema HVAC	54

4.3.5	Calcoli di progetto invernale ed estivo	55
4.4	Caso Studio	57
5	Il generatore fotovoltaico	59
5.1	Caratteristiche climatiche del sito	59
5.2	Tecnologia moduli fotovoltaici	62
5.3	Posizionamento pannelli	62
5.4	Ombreggiamento	64
5.5	Analisi della produzione del generatore fotovoltaico	75
5.5.1	Metodi di calcolo	75
5.5.2	Risultati	78
6	Risultati della simulazione Termoenergetica dell'edificio	89
6.1	Progetto termico dell'involucro	89
6.1.1	Calcolo della trasmittanza termica degli elementi edilizi	89
6.1.2	Stratigrafia originaria	90
6.1.3	Calcoli sulla stratigrafia aggiornata	93
6.2	Calcolo di progetto invernale ed estivo	96
6.3	Analisi dei consumi energetici	101
7	Analisi dei carichi elettrici e calcolo delle quote di Autoconsumo e Autosufficienza	115
7.1	Analisi dei consumi elettrici	115
7.2	Analisi della produzione fotovoltaica	122
7.2.1	Analisi per la Sala Studio 1	122
7.2.2	Analisi per la Sala Studio 2	136
7.2.3	Analisi della Sala Controllo e del Locale Tecnico	148
	Conclusioni	157

Introduzione

L'efficienza energetica degli edifici è stata riconosciuta come un concetto cardine sia per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra sia per la riduzione dei consumi di energia primaria. La direttiva 2010/31 del parlamento europeo stima che il 40% dei consumi di energia dell'intera Unione è dovuta agli edifici, così come il 36% di emissione di gas serra. Aumentare l'efficienza energetica dell'edificio permette in primo luogo di ridurre i fabbisogni di energia primaria, inoltre tale fabbisogno è possibile soddisfarlo tramite l'impiego di fonti rinnovabili. Gli accordi di Parigi, il cosiddetto COP21, hanno giocato un ruolo fondamentale sia per gli edifici sia per l'energia da fonti rinnovabili: l'obiettivo è la riduzione del 20% dei consumi di energia primaria entro il 2020 e l'aumento del 20% del consumo di energie rinnovabili sempre entro il 2020. La possibilità di progettare edifici ad energia quasi zero è strettamente legata all'impiego delle energie rinnovabili: infatti se il fabbisogno è estremamente ridotto, si può cercare di coprirlo interamente tramite energia pulita, utilizzando sistemi di accumulo per compensare l'intermittenza della risorsa utilizzata (sole, vento, maree ...). Da queste necessità è emersa una nuova concezione dell'edificio: il modulo abitativo prefabbricato. Questi moduli sono realizzati con materiali ecosostenibili e dalle elevate prestazioni energetiche, tra i quali spicca il legno, e grazie ad un'adeguata coibentazione con appositi materiali isolanti è possibile proporli nei climi più rigidi. E' un ambito di studio multidisciplinare che coinvolge l'ambito energetico, quello urbanistico, quello architettonico ma anche informatico in quanto la raccolta dati riveste un ruolo centrale per poter monitorare le condizioni di efficienza e di comfort.

Il lavoro di tesi si colloca nell'ambito del progetto PVZEN. E' un progetto nato all'interno del Politecnico di Torino e vede il coinvolgimento di più dipartimenti: DENERG, DAD, DET, EDILOG. L'obiettivo è la progettazione di un modulo abitativo prefabbricato all'interno del Politecnico che sia classificabile come un *Zero Energy Building* e la cui fonte primaria di energia derivi da un impianto fotovoltaico. L'altro grande obiettivo è rendere il modulo indipendente dalla rete elettrica, quanto più possibile. Per far ciò, è stato progettato un impianto da 8,64 kW costituito da tre generatori:

- un generatore composta dalla stringa orientata verso Sud-Ovest e quella orientata Nord-Est entrambe con potenza nominale 2160 W;
- un generatore sopra la Sala Studio 1 con orientamento Sud-Est con potenza nominale 2160 W;
- l'ultimo generatore è collocato sopra la Sala Studio 2 e ha orientamento Nord-Ovest con potenza nominale 2160 W.

Il modulo abitativo è stato progettato dalla startup *Be-eco* che ha sede nell' Incubatore di Imprese del Politecnico di Torino. L'edificio è già stato utilizzato come Penitenziera per l'ostensione della Sacra Sindone nel 2015, ma nel lavoro di tesi sono state apportate

modifiche architettoniche e tecniche con l'obiettivo di sfruttarlo come sala studio, sala riunione e sala tesisti.

Il nuovo edificio consta di quattro locali:

- due sale studio di eguali dimensioni con 10 postazioni computer;
- una sala tesisti o sala controllo orientata Sud-Ovest con tre postazioni;
- un locale tecnico sede di inverter e batterie.

Per ogni locale si sono ipotizzati i profili orari di occupazione, l'energia elettrica consumata da luci e dalle apparecchiature elettroniche. Lo studio è diviso in due parti principali. La prima riguarda l'utilizzo di SketchUp e del suo plug-in Open-Studio per la creazione del modello del modulo abitativo e la sua suddivisione in zone termiche. Sempre tramite SketchUp è possibile studiare gli elementi che causano l'ombreggiatura sul modulo abitativo e sul generatore fotovoltaico causando rispettivamente la perdita di apporti gratuiti e di radiazione solare. Una volta creato il modello, si è ottenuto un file in formato .IDF che è leggibile dall'altro software impiegato per la simulazione termo-energetica: Energy Plus. Grazie a quest'ultimo è stato possibile ottenere i valori dei carichi per riscaldamento e raffrescamento per ogni zona termica. Inoltre si sono studiati i giorni di progetto invernale ed estivo in modo da dimensionare la pompa di calore.

La seconda parte del lavoro si è basata sul calcolo dei consumi elettrici. Una volta ottenuti i valori dei carichi dovuti a riscaldamento, raffrescamento e ventilazione è stato possibile associare ad ognuno di essi un consumo elettrico: per quanto riguarda i primi due si è fatto uso del COP, per il secondo si è fatto ricorso ad un coefficiente che associa i Wh ai volumi di aria movimentata. Sempre tramite Energy Plus si sono impostati i parametri per definire il circuito a diodo equivalente per la cella fotovoltaica così da ottenere la produzione di ogni stringa. Infine l'ultimo studio è stato svolto sul calcolo delle quote di autoconsumo e autosufficienza dei diversi locali, ipotizzando però che la produzione sia separata; lo studio dell'accumulo e dello scambio di energia sul posto saranno oggetto di progetti futuri.

Capitolo 1

Il concetto di Edificio a Zero Energia

1.1 Definizione

Il concetto di Zero Energy Building si può declinare sotto molte voci in relazione alla diversa angolazione sotto la quale si interpreta l'edificio: lo si può osservare da un punto di vista energetico, economico o ambientale se si considerano le emissioni. Inoltre il concetto differisce anche a seconda del contesto socio-economico del paese che prevede di costruire un nZEB oltre che dal clima della regione e dalle abitudini costruttive [1].

Primo in ordine di tempo, in Germania nel 1988 si è sviluppato il concetto di *Passivhaus* che si fonda sullo sfruttamento passivo degli apporti gratuiti sia solari sia interni e su un'adeguata coibentazione. In particolare i requisiti sulla trasmittanza termica sono molto rigidi così come il fabbisogno netto di riscaldamento che non deve superare i 15 kWh/m^2 annui. Sul sito del Passivhaus Institute è presente la voce Requirements che certifica lo standard tecnico-impiantistico per una *Passivhaus*: elevato isolamento, orientamento ottimale per gli apporti solari e un basso rapporto di forma.

Negli Stati Uniti è nato il concetto di Zero Energy Building, intendendo un edificio destinato ad un abitativo con una domanda di energia molto ridotta e tale da essere soddisfatta dalla produzione di energia da fonti rinnovabili. Nell'esperienza americana uno ZEB non deve essere necessariamente scollegato dalla rete elettrica o termica, anzi il collegamento con la rete può risolvere per esempio il problema dell'accumulo fotovoltaico. E' impossibile sia tecnicamente sia economicamente che uno ZEB non consumi energia ma se il bilancio tra quantità dell'energia importata e di energia esportata è nullo allora si parla di net Zero Energy Building (nZEB). A sua volta si può coniugare questo concetto sotto diversi aspetti, secondo il NREL (National Renewables Energy Lab):

- si definisce *net Zero Source Energy Building* un edificio che produce o acquista tanta energia da fonte rinnovabile quanta energia primaria richiesta in un anno;
- si definisce *net Zero Site Energy Building* un edificio che produce tanta energia da fonte rinnovabile quanta ne consuma in un anno [1];
- una terza definizione riguarda non l'ambito energetico ma quello economico: si parla di *net Zero Energy Cost Building* quando l'ammontare che i gestori delle infrastrutture energetiche territoriali pagano al proprietario dell'immobile per le energie da esso autoprodotte in sito da fonti energetiche rinnovabili e riversate in rete (exported energy) è almeno pari al costo che il proprietario dell'immobile paga ai gestori stesso per le energie di cui necessita nel corso di un anno solare (delivered energy) [1];

- In ambito ambientale si parla di *net Zero Emission Building* che corrisponde ad un edificio che, nell'arco dell'anno solare, produce tanta energia rinnovabile a emissioni zero.

Dal punto di vista energetico la soluzione progettuale più adoperata è la *net Zero Source Energy Building* per cui il bilancio dell'energia primaria sia nulla. In sede di progetto è quindi necessario ridurre la richiesta di energia dell'edificio operando sulla trasmittanza termica dell'edificio, sullo sfruttare gli apporti passivi e sull'inerzia termica. Infine si deve provvedere a dimensionare l'impianto di produzione di energia rinnovabile in modo da soddisfare completamente il fabbisogno; sarebbe inoltre preferibile produrre energia in situ per evitare perdite di conversione e distribuzione .

In ambito europeo tramite la EPBD recast si introduce il concetto di *nearly net Zero Energy Building* ovvero un edificio ad elevata prestazione energetica in cui il fabbisogno di energia primaria, basso o quasi nullo, è prevalentemente o in toto ricoperto da fonti rinnovabili. Analogamente al caso americano, la REHVA (Federation of European Heating Ventilation and Air-conditioning Associations) ha stilato un articolo sottotitolato REHVA proposal for uniforme National implementation of EPBD recast in cui si differenziano i seguenti concetti:

- *net Zero Energy Building* (nZEB) è caratterizzato da una prestazione energetica che comporta un uso di energia primaria pari a $0 \text{ kWh}/(m^2 \text{ anno})$;
- *nearly net Zero Energy Building* (nnZEB) caratterizzato da una prestazione energetica che comporta un uso di energia primaria maggiore di $0 \text{ kWh}/(m^2 \text{ anno})$ in relazione al costo per realizzare l'edificio. Si ha un compromesso tra il costo e l'efficiamento dell'edificio.

1.2 Inquadramento legislativo

La principale normativa inerente ai Near Zero Energy Buildings è la Direttiva 2010/31/EU redatta dal Parlamento europeo in data 19 Maggio 2010, anche nota come EPBD "*Energy Performance of Building Directing*". In particolare l' Articolo 2 fornisce la definizione di NZEB ovvero un edificio avente un' elevata performance energetica valutata secondo l'Allegato I e la cui quota energetica deve essere coperta per larga parte da fonti energetiche rinnovabili. In particolare l'Allegato I definisce che *la prestazione energetica di un edificio deve essere determinata sulla base dell'energia annuale calcolata o effettiva che viene consumata al fine di soddisfare le diverse esigenze associate al suo uso tipico e deve riflettere il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il fabbisogno energetico di raffreddamento (energia necessaria per evitare surriscaldamento) per mantenere le condizioni di temperatura previste per l'edificio e il fabbisogno di acqua calda sanitaria*".

Il target temporale è imposto dall'Articolo 9 secondo cui tutti gli stati membri devono assicurare entro il 31 Dicembre 2020 che tutti i nuovi edifici siano Nearly zero-energy buildings così come tutti i nuovi edifici delle amministrazioni pubbliche dopo il 31 Dicembre 2018. La Direttiva distingue inoltre tra nuovi edifici (Articolo 6) e riqualificazione di edifici esistenti (Articolo 7). Per quanto riguarda l' Articolo 6 ogni Stato Membro deve garantire fattibilità tecnica, ambientale ed economica dei sistemi alternativi ad alta efficienza citati di seguito:

- Sistemi di approvvigionamento energetico decentralizzati basati su energia da fonti rinnovabili;

- cogenerazione;
- teleriscaldamento per riscaldamento e raffrescamento in particolare se basato integralmente o parzialmente su energia da fonti rinnovabili;
- pompe di calore.

Per quanto riguarda la Normativa italiana si fa riferimento al Decreto interministeriale 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici". Il Decreto definisce nell'Allegato 1 gli "edifici a energia quasi zero" come gli edifici, siano essi di nuova costruzione o esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati:

- tutti i requisiti della lettera b) , del comma 2 , del paragrafo 3.3, determinati con i valori vigenti dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici;
- gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di cui all'Allegato3, paragrafo 1, lettera c) del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28.

Si fa ora riferimento alla lettera b) del comma 2 del paragrafo 3.3 per evidenziare le caratteristiche termotecniche che evidenziano l'edificio a energia quasi zero:

- il parametro H'_T [W/m^2] , coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente, deve essere inferiore ai seguenti valori riportati in tabella

Numero Riga	RAPPORTO DI FORMA (S/V)	Zona Climatica				
		A e B	C	D	E	F
1	$S/V > 0,7$	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48
2	$0,7 > S/V > 0,4$	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53
3	$0,4 > S/V$	0,80	0,80	0,80	0,75	0,80
Numero Riga	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	Zona Climatica				
		A e B	C	D	E	F
4	Ampliamenti e Ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie	0,73	0,70	0,68	0,65	0,62

Tabella 1.1: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico H'_T [W/m^2]

- il parametro $A_{sol,est}/A_{suputile}$, determinato in base a quanto previsto al paragrafo 2.2 dell'Appendice A, risulti inferiore al corrispondente valore limite riportato nella Tabella 11 della Appendice A, rispettivamente per gli edifici della categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3), e per tutti gli altri edifici;

$$A_{sol,est} = \sum_k F_{sh,ob} \cdot g_{gl+sh} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p} \cdot F_{sol,est} [m^2] \quad (1.1)$$

dove:

$F_{sh,ob}$ é il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie vetrata k-esima, riferito al mese di luglio;

g_{gl+sh} é la trasmittanza di energia solare totale della finestra calcolata nel mese di luglio, quando la schermatura solare é utilizzata;

F_F é la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;

$A_{w,p}$ é l'area proiettata totale del componente vetrato (area del vano finestra);

$F_{sol,est}$ é il fattore di correzione per l'irraggiamento incidente, ricavato come rapporto tra l'irradianza media nel mese di luglio, nella località e sull'esposizione considerata, e l'irradianza media annuale di Roma, sul piano orizzontale.

Il valore di $A_{sol,est}$ rapportato all'area della superficie utile deve essere inferiore al valore massimo ammissibile riportato in Tabella:

#	Categoria edificio	Tutte le zone climatiche
1	Categoria E.1 fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3)	$\leq 0,030$
2	Tutti gli altri edifici	$\leq 0,040$

Tabella 1.2: Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva dei componenti finestrati e l'area della superficie utile $A_{sol,est}/A_{suputile}$ (-)

- le efficienze η_H, η_W e η_C , risultino superiori ai valori delle corrispondenti efficienze indicate per l'edificio di riferimento del comma 1, dell'articolo 2, del decreto legislativo e per il quale i parametri energetici e le caratteristiche termiche sono dati nelle Tabelle 7 e 8 dell'Appendice A.

Il quadro legislativo sia europeo sia italiano è molto dettagliato proprio per incentivare l'introduzione di questi edifici.

1.3 Layout generico

Il concetto di edifici a energia quasi zero coniuga insieme gli aspetti di termofisica dell'edificio, climatizzazione ed energie rinnovabili: infatti l'edificio ideale è rappresentato dalla perfetta sinergia di questi tre aspetti. Oltre all'efficienza energetica bisogna garantire il confort termoigrometrico per gli occupanti definito oggettivamente come lo stato di neutralità termica ovvero l'assenza di accumulo nel corpo umano di energia termica e dei meccanismi di termoregolazione comportamentale e vasomotrice. Se ne deduce che per garantire questo standard bisogna operare sui seguenti livelli:

- temperatura dell'aria [$^{\circ}\text{C}$];
- temperatura operativa [$^{\circ}\text{C}$] definita dalla norma UNI EN ISO 7730:2006

$$t_0 = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_{mr} \quad (1.2)$$

dove il parametro "A" vale 0,5 per velocità dell'aria minori di 0,2 m/s, come raccomandato dallo standard *Passivhaus*;

- velocità dell'aria [m/s] ;
- umidità relativa.

Uno dei più famosi layout è stato studiato dal *Passivhaus Institute* che definisce le specifiche necessarie affinché un edificio possa essere considerato una casa passiva. Quest'ultimo concetto è molto simile a quello di nZEB : entrambi richiedono che la quota di energia richiesta sia soddisfatta da fonti rinnovabili, l'efficienza energetica deve essere elevata e la richiesta di energia primaria sia pressoché nulla. In aggiunta lo standard *Passivhaus* focalizza l'attenzione sullo sfruttamento degli elementi passivi per soddisfare il fabbisogno di energia per riscaldamento e raffrescamento ambientale interno. In quest'ottica acquistano notevole importanza le componenti trasparenti, capaci di trasmettere all'interno la radiazione solare incidente, e l'isolamento termico che deve essere ottimale per ridurre le perdite di calore verso l'esterno. Di seguito sono riportati i punti salienti del concetto della casa passiva secondo il *Passivhaus Institute*:

- a) Isolamento termico: Tutti i componenti di costruzione opachi dell'involucro esterno della casa devono essere ben isolati. Per la maggior parte dei climi a temperatura controllata, ciò significa al massimo un coefficiente di trasferimento del calore U , di $0,15 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$;
- b) finestre passive della casa: i telai delle finestre devono essere ben isolati e dotati di vetrate low-e riempite con argon o kripton per impedire il trasferimento di calore. Per la maggior parte dei climi a temperatura ambiente, questo significa un valore U di $0,80 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$ o inferiore, con valori g intorno al 50;
- c) recupero di calore di ventilazione: la ventilazione efficiente per il recupero del calore è fondamentale, consentendo una buona qualità dell'aria interna e un risparmio energetico. In *Passivhaus*, almeno il 75 % del calore dell'aria di scarico viene trasferito nuovamente all'aria fresca mediante uno scambiatore di calore;
- d) ermeticità dell'edificio: perdite incontrollate attraverso gli spazi devono essere inferiori a 0,6 del volume totale della casa all'ora durante un test di pressione a 50 Pascal (sia pressurizzato che depressurizzato);
- e) assenza di ponti termici: tutti i bordi, gli angoli, i collegamenti e le penetrazioni devono essere pianificati ed eseguiti con molta cura, in modo da evitare ponti termici. I ponti termici che non possono essere evitati devono essere minimizzati il più possibile.

In generale gli edifici ad energia quasi zero utilizzano la combinazione pannelli fotovoltaici e pompe di calore per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.

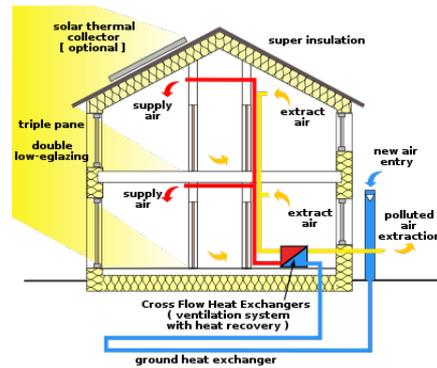


Figura 1.1: Schema generico di una passivhaus

1.4 Esempi di Zero Energy Building

1.4.1 NIST Test House

La NIST Test House, costruita dal National Institute of Standards and Technology a Washington D.C., è l'esempio di un edificio a energia quasi zero modellato come una test house ovvero una casa fittizia nella quale si simulano i consumi e i fabbisogni di una tipica famiglia americana di quattro persone. Si tratta di un edificio a due piani costituito da quattro camere da letto, tre bagni e un laboratorio di ricerca per la raccolta dei dati. All'interno vi abitano due adulti e due bambini e il loro stile di vita viene accuratamente riprodotto per stimare in modo quanto più accurato possibile i consumi. L'edificio consta di un involucro opaco ad alta efficienza, un sistema di ventilazione ad aria esterna, tre pompe di calore geotermiche, un sistema di riscaldamento a pavimento produzione di acqua calda da collettori solari e di energia elettrica da pannelli fotovoltaici. L'istituto ha svolto simulazioni per due anni ottenendo risultati molto positivi: durante il primo anno la casa ha prodotto un surplus di energia di 484 kWh, circa il 4% del consumo totale, mentre il secondo anno il surplus è stato di 2139 kWh, il 18%. Questi risultati [2] sono molto importanti perché dimostrano che una casa di simile dimensione, estetica e servizi può generare tanta energia quanta ne consuma; inoltre il NIST ha si pone come obiettivo l'informazione dell'opinione pubblica riguardo gli edifici ad energia quasi zero.



Figura 1.2: Nist Test House

1.4.2 Il quartiere BedZED

Il Beddington Zero Energy Development è un quartiere di Londra costruito tra il 2000 e il 2002 e famoso per essere il primo insediamento senza emissioni di CO_2 . L'architetto Bill Dunster si è preoccupato che anche le emissioni durante la fase di realizzazione fossero ridotte al minimo utilizzando i materiali come il legno di quercia, i mattoni e il gesso che provenissero da non più di 60 Km di distanza così da ridurre il petrolio utilizzato per gli spostamenti. Il legno è un ottimo materiale per le sue proprietà termiche e per il controllo dell'umidità mentre il cemento è utilizzato per immagazzinare calore in blocchi e lastre per pavimenti e soffitti, contribuendo a mantenere una temperatura confortevole e uniforme, giorno e notte, durante tutto l'anno. Il complesso è inoltre dotato di un sistema di ventilazione che aspira l'aria dall'esterno e la tratta tramite un sistema HVAC scambiando calore con l'aria viziata in uscita dall'edificio. Grazie alla ventilazione non è necessario aprire le finestre e si evitano così perite di calore nella stagione invernale [3]. I componenti trasparenti giocano un ruolo fondamentale per il riscaldamento passivo solare utilizzando spazi solari vetrati a più piani esposti a sud. La produzione di energia elettrica è assicurata dai pannelli fotovoltaici installati sia sul tetto del complesso sia integrati sulle vetrate a sud; l'eventuale energia in eccesso viene esportata nella griglia locale. I monitoraggi effettuati nel 2003 evidenziarono le seguenti riduzioni in relazione agli standard del Regno Unito: il fabbisogno per il riscaldamento è calato del 88 %, la richiesta di acqua calda sanitaria è calata del 57 % e infine l'energia elettrica consumata è il 25 % in meno rispetto agli standard di cui il 11 % è prodotto dai pannelli fotovoltaici e la quota restante è coperta da un impianto CHP che usa i trucioli di legno come combustibile.



Figura 1.3: Complesso residenziale Beddington

1.4.3 Il modulo abitativo PUR-E-House

Il nome PUR-E-House è la sigla per *Polyurethan Eco House* ed è un progetto del Politecnico di Milano [4]. Il modulo abitativo è di 29 mq, con una struttura flessibile e modulare che permetta l'implementazione di ulteriori soluzioni per sviluppare il modulo. L'edificio è una costruzione stratificata costruita completamente a secco con involucro poliuretano. La struttura è costituita da pilastri e travi in legno lamellare con un involucro isolato e ventilato. L'involucro è realizzato con pannelli sandwich, lineari e curvi, in poliuretano rivestiti con lamina di alluminio e profili metallici in acciaio integrati. Grazie a questa tecnologia, l'involucro consente ottime prestazioni dal punto di vista acustico e termoigrometrico, massimizzando quindi il confort degli occupanti.

L'energia elettrica è assicurata grazie all'impiego di moduli fotovoltaici collocati sul tetto del modulo abitativo. La ventilazione naturale è assicurata dall'impiego di lucernari posti sulla copertura che garantiscono sia ricambio d'aria sia illuminazione. Inoltre è presente anche un serbatoio con il compito di raccogliere l'acqua piovana. E' possibile controllare tramite la domotica dei pannelli oscuranti e schermanti collocati all'esterno in modo da ridurre gli apporti solari.



Figura 1.4: Sezione del modulo abitativo PER-E-House

1.4.4 Il modulo abitativo Biosphera 2.0

Il modulo Biosphera 2.0 è oggetto di attività di ricerca avviato dal team Aktivhaus insieme al Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino e all'Università della Valle d'Aosta. Il modulo ha una superficie calpestabile di 25 mq ed è stato pensato per soddisfare tutti i bisogni e garantire al tempo stesso il confort termico degli occupanti. Vi sono tutti gli elementi che costituiscono una normale abitazione: illuminazione a LED, zona notte, zona cucina, zona relax, servizi igienici e una zona fitness. Il modulo è in grado di fornire autonomamente, quindi senza l'utilizzo di una fonte esterna, una temperatura interna confortevole dell'aria e delle superfici compresa tra i 21°C in inverno e i 25°C in estate.

La casa è certificata secondo gli standard di efficienza energetica più avanzati: lo standard *Passivhaus* e lo standard *Minergie*. Del primo si è già discusso in precedenza, il secondo certifica gli edifici dotati di un involucro ermetico, un buon isolamento, un efficiente impianto di riscaldamento/raffrescamento, un impianto di ventilazione controllata e un'adeguata protezione termica estiva. Inoltre il legno, che costituisce l'elemento base del modulo, è certificato secondo lo standard PEFC che si occupa di promuovere la gestione forestale sostenibile e la tracciabilità lungo le filiere forestali.

Il modulo è stato oggetto di raccolta dati durante i 12 mesi dell'anno da parte del team Aktivhaus, del Politecnico di Torino DAD, dell'Università della Valle d'Aosta, dell'Istituto ZEPHIR-Passivhaus Italia e dell'Istituto MINERGIE Svizzero [5]. La raccolta dati si focalizza sia sulle prestazioni energetica sia sul confort degli occupanti ed è stata svolta sottoponendo il modulo a condizioni termiche estreme, da -15°C a 40°C. Sul sito del progetto è possibile visionare i dati relativi al bilancio energetico e i seguenti dati: temperature dell'aria e umidità esterne al modulo, temperature dell'aria e delle pareti e umidità interne al modulo, qualità dell'aria, polveri sottili PM10, CO2, presenza di etanolo e aldeidi e presenza e intensità di campi elettromagnetici. Inoltre gli occupanti hanno indossato un braccialetto sviluppato dalla ditta *Empatica* che, oltre a rilevare il battito cardiaco, rileva la temperatura interna e l'attività elettrodermica, così da avere dei dati per il confort termico.

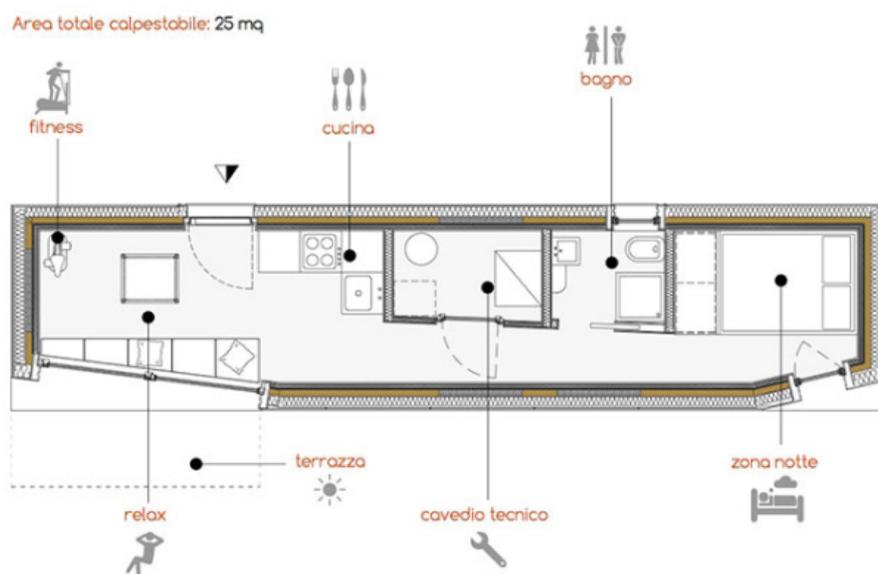


Figura 1.5: Planimetria del modulo abitativo Biosphera 2.0

Capitolo 2

Riferimenti teorici

2.1 Termofisica dell'involucro edilizio

La termofisica dell'involucro edilizio è la scienza che studia gli scambi termici tra il sistema ambiente e il sistema edificio in funzione delle proprietà fisiche dei materiali. L'involucro si divide in involucro opaco e trasparente. Il primo è caratterizzato da fenomeni di trasmissione del calore dovuti dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno e da accumulo termico dovuto alla variazione della sollecitazione termica nel tempo. Nella situazione invernale si punta a coibentare l'edificio per ridurre le trasmissioni di calore verso l'esterno e creare una situazione di confort termico nella quale si abbia in tutta la zona termica una temperatura simile. Lo studio del comportamento invernale dell'involucro avviene in regime stazionario, considerando come temperatura esterna la temperatura più bassa per il sito considerato; nella stagione estiva si considera la fluttuazione sinusoidale della temperatura per studiare il fenomeno di accumulo di calore all'interno della parete e il rilascio verso l'interno o esterno nel tempo.

Il componente trasparente isola da convezione e conduzione meno di un componente opaco ma consente la trasmissione di energia tramite irraggiamento. I parametri fondamentali per caratterizzare il componente trasparente sono la trasmittanza termica e il fattore di trasmissione totale. Il calcolo della trasmittanza si basa sulla norma UNI EN ISO 10077-1; il coefficiente di trasmissione solare totale, indicato come g-value o TSET, è definito come il rapporto tra il flusso dovuto alla radiazione solare complessivamente entrante in ambiente e la radiazione solare incidente sull'elemento vetrato. I parametri caratteristici necessari a descrivere questo parametro sono:

- coefficiente di trasmissione solare τ :

$$\tau = \frac{\tau \cdot I}{I} \quad (2.1)$$

dove τI è l'energia solare trasmessa all'interno dell'ambiente e I l'energia solare incidente sulla parete vetrata.

- coefficiente di riflessione totale ρ :

$$\rho = \frac{\rho \cdot I}{I} \quad (2.2)$$

dove ρI indica l'energia solare riflessa;

- coefficiente di assorbimento solare α

$$\alpha = \frac{\alpha \cdot I}{I} \quad (2.3)$$

dove αI indica la quota di energia solare assorbita.

La somma dei tre coefficienti appena descritti è pari ad 1 ed indica l'energia totale incidente sulla superficie vetrata.

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (2.4)$$

Il coefficiente di trasmissione è dato dal rapporto tra la somma del contributo di energia trasmessa attraverso il serramento e di una componente che viene assorbita dalla vetratura e trasmesso all'interno dell'ambiente per convezione e irraggiamento e la radiazione solare incidente: il primo contributo è indicato come τI , il secondo $N\alpha I$.

$$g = \frac{(\tau + N \cdot \alpha) \cdot I}{I} = (\tau + N \cdot \alpha) \quad (2.5)$$

Per valutare la qualità dell'isolamento termico dell'edificio si fa riferimento alla trasmittanza termica; per il comportamento estivo è più complesso perché, oltre alle caratteristiche proprie dei materiali (massa frontale, capacità termica frontale), entrano in gioco la trasmittanza termica periodica, il fattore di attenuazione e lo sfasamento termico possono essere ritenuti parametri termici dinamici. I parametri che vengono utilizzati a livello legislativo nazionale per valutare le prestazioni dell'involucro opaco in regime dinamico sono la massa superficiale M_S e la trasmittanza termica periodica Y_{IE} .

2.1.1 Proprietà termofisiche dei materiali

La trasmittanza termica è il parametro fondamentale per valutare il grado di isolamento termico sia dell'involucro opaco sia del componente vetrato. Dato un componente edilizio che separa due ambienti a temperature differenti (tipicamente ambiente esterno da interno), la trasmittanza termica unitaria del componente è definita come la potenza termica che attraversa tale componente per unità di superficie e in presenza di una differenza di temperatura unitaria tra i due ambienti [6]. Ne consegue che la sua unità di misura nel Sistema Internazionale è $W/(m^2K)$ e matematicamente è definita come:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^{n_1} \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^{n_2} R_j + \frac{1}{h_e}} \quad (2.6)$$

dove i termini rappresentano:

- h_i e h_e sono i coefficienti di scambio termico liminare interno ed esterno definiti dalla norma UNI EN ISO 6946;
- R_j è la resistenza termica del j-esimo elemento definita nelle norme UNI 10355 e UNI EN ISO 6946;
- λ_j è la conducibilità termica del j-esimo elemento, misurata in $W/(mK)$ e definita nella norma UNI 10351;
- d_j è lo spessore del j-esimo elemento [m]

E' importante evidenziare che minore è il valore della trasmittanza termica, migliore è l'isolamento dell'involucro. Per diminuire il valore della trasmittanza si può operare sia diminuendo la conducibilità termica sia aumentando lo spessore della parete: infatti una minore conducibilità implica una maggiore difficoltà di trasmissione del calore via conduzione ed è quindi possibile limitare le perdite di calore dall'ambiente interno riscaldato verso l'esterno a temperatura inferiore.

Per un componente vetrato il calcolo si deve fare distinzione tra i tre elementi costituenti la vetrata: il sistema vetrato, il telaio e la schermatura solare [7]. I primi due elementi costituiscono il cosiddetto serramento, il terzo indica gli elementi come le persiane e le avvolgibili che oscurano gli apporti solari. Nel calcolare la trasmittanza termica bisogna tenere conto dei primi due termici elencati:

$$U_W = \frac{\sum A_g \cdot U_g + \sum A_f \cdot U_f + \sum l_g \cdot \psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (2.7)$$

dove i vari termini rappresentano:

- A_g è l'area dell'elemento trasparente [m^2];
- U_g è la trasmittanza termica dell'elemento trasparente che si valuta nel seguente modo:

$$U_g = \frac{1}{R_{SE} + \sum_j \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_j R_{sj} + R_{si}} \quad (2.8)$$

con R_{sj} che rappresenta la resistenza termica della j-esima intercapedine, in m^2K/W ;

- A_f è l'area del telaio in m^2 ;
- U_f è la trasmittanza termica del telaio, espressa in $W/(m^2K)$;
- l_g è il perimetro totale visibile dell'elemento trasparente;
- ψ_g è la trasmittanza termica lineare dovuta all'effetto termico combinato di elemento trasparente, distanziatore e telaio, espressa in $W/(mK)$. In mancanza di informazioni da parte del venditore, la norma UNI EN ISO 10077-1 fornisce dei valori caratteristici per diversi tipi di accoppiamento telaio-vetro.

Per tenere in conto dell'effetto di persiane o elementi oscuranti, si apporta una correzione alla trasmittanza appena descritta aggiungendo una resistenza aggiuntiva:

$$U_{ws} = \frac{1}{\frac{1}{U_w} + \Delta R} \quad (2.9)$$

La conducibilità termica, indicata in letteratura con λ , è la potenza termica che attraversa uno strato di spessore unitario, a causa di un gradiente di temperatura unitario tra le due facce in esame, in regime stazionario. In pratica la conducibilità indica la facilità con cui una sostanza si fa attraversare da un flusso termico per conduzione, descritto dalla legge di Fourier. Nel sistema internazionale l'unità di misura è $W/(mK)$. La norma UNI 10351 presenta i valori di conducibilità per diversi materiali da conduzione.

Il calore specifico è la quantità di energia necessaria per innalzare di un grado la temperatura di una sostanza, per unità di massa. Nel sistema internazionale è espresso in $J/(kg K)$. Il calore specifico influisce sulla capacità termica della struttura che si riflette

sull'attitudine ad accumulare e rilasciare calore. Altro parametro importante è la densità, indicata in letteratura con ρ , espressa in kg/m^3 . I tre parametri appena descritti sono influenzati dalla variazione di temperatura, ma molto spesso, in queste analisi, la loro variazione è trascurata.

2.1.2 Metodi di isolamento dell'edificio

Si definiscono materiali isolanti i materiali aventi conducibilità termica $\lambda < 0,065 \text{ W}/(\text{m K})$. Essi devono offrire sia una buona coibentazione sia un'adeguata durabilità in modo che le proprietà termiche non decadono nel tempo. Esistono diverse soluzioni per la collocazione dell'isolante all'interno della stratigrafia, ognuna delle quali presenta vantaggi e svantaggi. Si elencano per prime le soluzioni per le pareti verticali.

Se l'isolante viene collocato sulla superficie interna di una parete verticale, si parla di isolamento interno. Tra i vantaggi ci sono: la facilità di messa in opera e il raggiungimento rapido della temperatura interna desiderata poiché si esclude l'inerzia termica della parete di supporto. Tuttavia si ha la formazione di ponti termici, si riduce la superficie abitabile e il controllo del comfort igrometrico risulta difficoltoso. Si usa questa tecnica principalmente per ambienti riscaldati saltuariamente e per gli edifici nei quali la riqualificazione termica è difficoltosa dall'esterno.

Quando l'isolante è posto sulla superficie esterna, si tratta del cosiddetto isolamento "a cappotto". L'isolante è posizionato mediante chiodi e ancoraggi sulla superficie esterna, ciò rende l'edificio abitabile durante i lavori di riqualificazione ma aumenta la volumetria esterna con possibili implicazioni legami. Per evitare il contatto diretto dell'isolante con gli agenti atmosferici, si aggiunge uno spessore sottile di rifinitura realizzato con intonaci particolari. La notevole riduzione dei ponti termici e l'elevata inerzia termica rappresentano dei vantaggi. L'elevata inerzia termica da un lato è utile durante il periodo notturno quando l'edificio non è riscaldato, ma dall'altro causa un più lento raggiungimento della temperatura ottimale. Si può usare la tecnica di isolamento a cappotto sia per edifici nuovi sia per edifici sui quali è necessaria una riqualificazione energetica.

In Italia è molto diffusa la tecnica di isolamento nelle intercapedini tra due pareti per la riqualificazione energetica. Il modello di stratigrafia è costituito da un blocco in laterizio interno con funzione portante, l'intercapedine riempita dall'isolante e un ulteriore strato di laterizio esterno. Tra i principali vantaggi si elencano: rapido raggiungimento della temperatura di set-point se l'impianto è utilizzato ad intermittenza, l'aumento della temperatura media radiante e permette un elevato potere fonoisolante grazie all'elevata massa caratteristica del mattone pieno posto all'esterno. Inoltre l'isolante è posto al riparo dagli agenti atmosferici così da limitare la degradazione dell'isolante nel tempo. Gli svantaggi principali riguardano la formazione di condensa, l'impossibilità di riduzione degli effetti dei ponti termici e dubbi sulla durabilità della resistenza termica.

La facciata ventilata rappresenta un'altra soluzione costruttiva. E' composta da una struttura metallica portante fissata al muro esterno dell'edificio e da uno strato di isolante termico posto sulla parete da rivestire. Grazie all'intercapedine d'aria di circa 5-7 cm si sviluppa la ventilazione naturale tra la struttura e il rivestimento esterno. All'interno dell'intercapedine si genera, per l'effetto camino, un flusso d'aria ascendente che favorisce sia la cessione verso l'esterno per l'evaporazione dell'eccesso di vapore acqueo prodotto negli ambienti interni, sia la completa evaporazione dell'acqua di costruzione in eccesso all'inizio della vita dell'edificio[7]; in questo modo si evita la formazione di condensa interstiziale e superficiale.

2.1.3 Inerzia termica dell'edificio

Durante il periodo estivo l'analisi va condotta in regime dinamico, ovvero considerando la fluttuazione della temperatura nell'arco della giornata. L'inerzia termica è descritta mediante legami funzionali tra conducibilità λ , calore specifico c_p e densità ρ ed indica la capacità di un componente opaco di accumulare calore e ritrasmetterlo, sfasandone il rilascio nel tempo. Si hanno due principali fenomeni: lo sfasamento e l'attenuazione dell'onda termica. Le sollecitazioni che colpiscono la zona termica si dividono in esterne ed interne. Le prime riguardano la variazione giornaliera sia della temperatura sia della radiazione solare; le sollecitazioni interne dipendono dagli apporti interni, dall'intermittenza degli impianti di raffrescamento e riscaldamento e dalla radiazione solare attraverso il componente trasparente.

Esistono due tipologie di parametri che influenzano l'inerzia termica dell'edificio: quelli che dipendono dalle proprietà dei materiali e i parametri termici dinamici, dipendenti dalla fluttuazione della temperatura. I primi sono:

- Massa Termica frontale, o superficiale, indicata con M_s , che rappresenta la massa della parete per unità di superficie frontale

$$MF = \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot s_i [kg/m^2] \quad (2.10)$$

- Capacità Termica frontale, CF, descritta come l'energia termica immagazzinata nella parete per ogni grado di aumento della sua temperatura media e riferita alla superficie frontale

$$CF = \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot s_i \cdot c_i [kJ/(m^2 K)] \quad (2.11)$$

Gli altri parametri termici dinamici che non dipendono dai materiali sono descritti nella norma UNI EN ISO 13786. La norma si basa sul calcolo delle ammettenze e considera come sollecitazione termica esterna di tipo sinusoidale, con periodo 24 ore. I parametri sono:

- Trasmittanza termica periodica, Y_{IE} definita come l'ampiezza complessa della densità di flusso termico attraverso la superficie del componente adiacente all'ambiente interno i , diviso per l'ampiezza complessa della temperatura nell'ambiente esterno [8] è:

$$Y_{IE} = \frac{L_{IE}}{A} \quad (2.12)$$

dove A è la superficie frontale e L_{IE} è la conduttanza termica periodica, ossia il numero complesso che correla il flusso termico periodico su un lato del componente con la temperatura periodica sul lato opposto del componente stesso, in condizioni sinusoidali. La trasmittanza termica periodica indica la densità di flusso termico trasmesso all'interno per unità di superficie frontale e per una temperatura interna costante;

- il fattore di attenuazione, f , è definita come il rapporto fra la trasmittanza termica periodica (dinamica) Y_{ie} del componente e la sua trasmittanza termica (stazionaria) U ; è sempre compreso tra 0 ed 1 e Indica il decremento percentuale di flusso termico entrante nell'ambiente interno rispetto a quello che entrerebbe attraverso una parete avente capacità termica nulla;

- lo sfasamento, ϕ_a , che rappresenta la differenza tra l'istante in cui la sollecitazione è massima sul componente esterna e massima sul componente interno;
- la Capacità areica interna, k_i , che esprime l'attitudine del componente ad accumulare calore quando è sottoposto ad una sollecitazione termica dinamica sulla faccia interna.

2.1.4 Bilancio di energia sull'edificio

Per ogni edificio è necessario individuare le zone termiche, definite come le porzioni di edificio climatizzate ad una determinata temperatura con identiche modalità di regolazione [9]. Per ogni zona termica si effettua il bilancio di energia applicabile ad un sistema aperto che si presenta come segue:

$$\sum_i Q_i + \sum_i L_i + \sum_i \dot{m}_i \cdot \left(h_i + gz_i + \frac{w_i^2}{2} \right) \cdot \Delta t = \sum_o Q_o + \sum_o L_o + \sum_i \dot{m}_o \cdot \left(h_o + gz_o + \frac{w_o^2}{2} \right) \cdot \Delta t + \Delta E_{V.C.} \quad (2.13)$$

dove :

- i pedici i e o i indicano rispettivamente condizioni di ingresso ed uscita;
- Q è il calore in ingresso/uscita dal sistema [kJ];
- L è il lavoro [kJ];
- $\Delta E_{V.C.}$ è la variazione di energia del volume di controllo in un intervallo di tempo Δt , in [kJ];
- m è la portata massica in kg/s, h è l'entalpia specifica [kJ/kg], g è l'accelerazione di gravità $9,81 \text{ m/s}^2$, z è la quota rispetto ad un piano di riferimento [m] e w è la velocità del fluido [m/s].

Se si è in regime stazionario con un solo ingresso e una sola uscita, la portata è la medesima; inoltre per il regime stazionario si ha che la variazione di energia interna nel volume di controllo è nulla:

$$\Delta E_{V.C.} = 0 \quad (2.14)$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m}, \dot{m} = \text{costante} \quad (2.15)$$

Inoltre se si ipotizzano come trascurabili le variazioni di energia cinetica e potenziale, se si considera il fluido che attraversa il volume di controllo come aria secca assimilabile ad un gas ideale e se si considera che per un edificio lo scambio di lavoro è nullo, allora il bilancio si riduce a:

$$\sum_i Q_i = \sum_o Q_o + \dot{m} \cdot c_{pa} \cdot (\theta_e - \theta_i) \cdot \Delta t \quad (2.16)$$

I termini di ingresso ed uscita differiscono per i due casi invernale ed estivo. Nel caso invernale il termine $\sum_i Q_i$ comprende: il calore fornito dall'impianto di riscaldamento Q_{risc} , il calore derivante dagli apporti solari gratuiti Q_{sol} e il calore dovuto agli apporti interni Q_{int} . Quest'ultimo è dato dalla somma dei contributi delle apparecchiature interne, degli apparecchi di illuminazione e quelli dovuti al metabolismo degli occupanti. Il termine di perdite $\sum_o Q_o$ è dato dalle perdite per trasmissione attraverso le pareti dell'edificio e dalla ventilazione.

$$Q_{H,nd} + Q_{int} + Q_{sol} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} \quad (2.17)$$

L'obiettivo dell'analisi è di valutare l'energia termica che l'impianto deve erogare per riscaldare gli ambienti. Una volta ottenuto questo valore, si estende l'analisi a tutta la stagione di riscaldamento, definita nel DPR 412/93 in base alla zona climatica, per analizzare la richiesta stagionale di energia primaria. L'analisi si effettua in regime stazionario, supponendo come temperatura di progetto esterna quella della condizione più gravosa: nel caso di Torino -8°C . Per tenere conto degli effetti dinamici nel modello di calcolo si introducono il coefficiente di utilizzazione degli apporti gratuiti $\eta_{H,gn}$ (durante il riscaldamento) e il coefficiente di perdita $\eta_{C,is}$ (durante il raffreddamento). Grazie a questi termini è possibile rappresentare la reale quota degli apporti e delle perdite che vengono effettivamente utilizzati. L'equazione si presenta come segue:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (2.18)$$

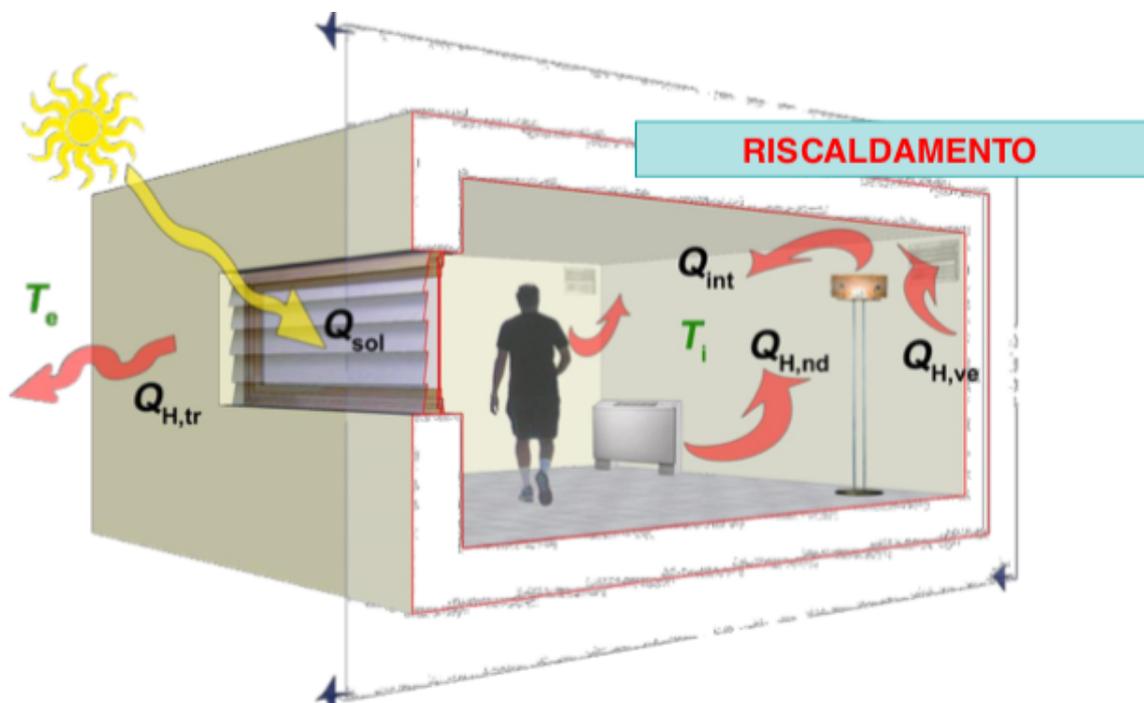


Figura 2.1: Rappresentazione schematica del bilancio invernale

Nel caso estivo le considerazioni da fare sono opposte. I termini di apporti gratuiti, solari ed interni, rappresentano un ostacolo per il sistema di raffreddamento che deve smaltire un'energia termica sensibile maggiore. Dall'altro lato, le perdite per trasmissione e ventilazione sono un "vantaggio" in quanto riducono il carico. La formulazione matematica presenta segni opposti rispetto al caso invernale:

$$Q_{C,nd} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,is} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (2.19)$$

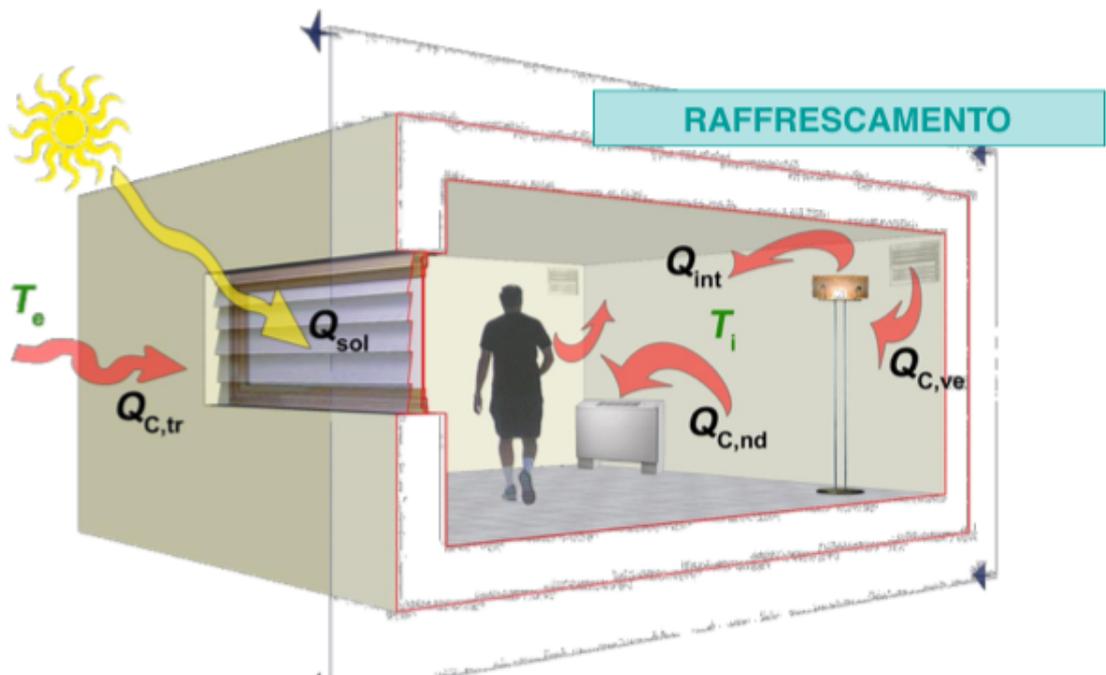


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del bilancio estivo

2.2 Generazione fotovoltaica dell'energia

La conversione dell'energia solare in energia elettrica avviene attraverso la cella solare. Si tratta di una conversione dell'energia diretta poiché non vi sono passaggi intermedi che utilizzano altri vettori energetici come l'energia meccanica o i combustibili fossili. Non tutta l'energia del sole è convertita in energia elettrica, ma solo una piccola parte: infatti il rendimento di una cella al silicio cristallino, c-Si, si aggira intorno al 21-22 %. L'energia elettrica prodotta dal modulo fotovoltaico è in corrente continua, ma un'abitazione utilizza la corrente alternata, quindi c'è bisogno di uno strumento per la conversione: l'inverter.

I principali vantaggi della tecnologia fotovoltaica sono: assenza di inquinamento, alta affidabilità e durabilità, bassi costi di manutenzione e la produzione in loco dell'energia quindi senza le perdite di trasmissione. Tra i principali svantaggi si riconoscono: l'intermittenza di funzionamento dovuto alla variabilità delle condizioni meteo, l'impiego di componenti aggiuntivi come batteria per lo stoccaggio e l'inverter per convertire la corrente da continua ad alternata e i costi di installazione ancora ad oggi alti [10].

Si definisce modulo fotovoltaico, o pannello, il collegamento in serie di celle solari. Dopo essere state saldate tra di loro, le celle sono racchiuse ermeticamente tra due pannelli tra cui quello frontale è un vetro ad alta trasmissività per consentire il passaggio della luce solare. Un polimero termoplastico, trasparente alla luce e inalterabile nel tempo (acetato di vinil etilene, EVA), avvolge le celle e salda fra loro i due pannelli (processo di laminazione), rendendo compatta ed ermetica la struttura [11].

Le prestazioni del pannello vengono ripostate alle condizioni *Standard Test Condition* o STC. Si tratta di una condizione di laboratorio alla temperatura di 25°C, irradianza di 1000 W/m², massa d'aria AM=1,5. I dati di targa riportano alle condizioni STC i seguenti valori: la potenza massima di picco W_P , la corrente di corto-circuito I_{sc} , la tensione a circuito aperto U_{oc} e la corrente e la tensione al punto di massima potenza, rispettivamente I_M e U_M . Come già riportato, si tratta di condizioni di laboratorio, allora solitamente si riportano anche i valori corrispondenti alle *Normal Operating Cell Temperature*, abbreviato in letteratura come NOCT. Tale temperatura di cella è un parametro caratteristico del modulo, fornito dal costruttore e definito come la temperatura a cui si stabilizza il modulo, funzionante a circuito aperto e sottoposto a una irradianza di 800 W/m², con una velocità del vento di 1m/s e una temperatura ambiente T_a di 20 °C. Dalla temperatura di NOCT e dalla temperatura ambiente è possibile risalire alla temperatura della cella durante l'operazione:

$$T_{cella} = T_{aria} + \frac{T_{NOCT} - 20(^{\circ}C)}{800(W/m^2)} \cdot G(W/m^2) \quad (2.20)$$

Quando l'impianto non è collegato alla rete elettrica, si definisce *Stand Alone*. Se l'impianto non presenta accumulo elettrochimico, il fotovoltaico viene impiegato nei sistemi di pompaggio. In questo caso l'impianto è costituito dal generatore fotovoltaico, dal motore elettrico, dalla pompa e dal serbatoio. Il collegamento diretto al motore può avvenire se quest'ultimo è in corrente continua; se invece il motore è asincrono, è necessario un inverter per convertire la corrente da continua ad alternata. La presenza di un accumulatore permette una maggiore flessibilità di esercizio e la stabilizzazione della tensione intorno al punto di massima potenza: un esempio sono le batterie al litio.

Gli impianti connessi alla rete, o *grid connected* si dividono in centralizzati e decentralizzati. I primi sono di proprietà dei grandi distributori, pertanto hanno potenza dell'ordine dei MW e sono utilizzati per coprire i carichi di punta nelle ore centrali della

giornata. Gli impianti decentralizzati sono di proprietà di privati e la potenza è dell'ordine dei kW. Sono usati soprattutto per uso residenziale per ottenere un risparmio energetico. La connessione alla rete da un alto consente la continuità di servizio in caso di assenza di radiazione solare, dall'altro permette la vendita dell'energia in eccesso.

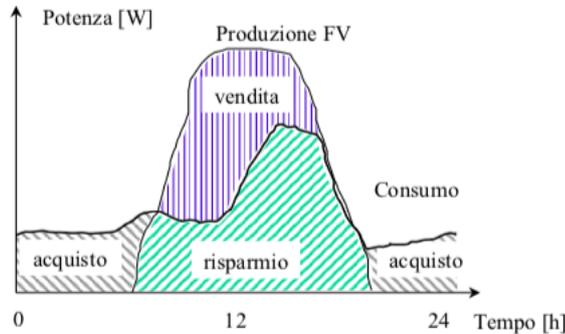


Figura 2.3: Scambio di energia tra generatore fotovoltaico e rete

2.2.1 Struttura e funzionamento della cella solare

La cella solare è l'elemento base che costituisce un generatore fotovoltaico. Il materiale costituente la cella è un semiconduttore, normalmente il silicio o in alternativa il diseleniuro di Indio e Rame o il tellururo di Cadmio. A sua volta le celle al silicio si dividono in monocristalline (m-Si), policristalline (p-Si) e a film sottile con silicio amorfo a-Si.

Una cella solare è un diodo costituito da due substrati: uno drogato da ioni del tipo "P", generalmente il Boro, trivalente, e un altro di tipo "N" che viene depositato sul precedente, costituito generalmente dal Fosforo, pentavalente. Si osserva una diffusione di ioni attraverso la giunzione, in particolare gli elettroni diffondono dalla regione N alla regione P e si forma uno strato di cariche positive nella regione N, viceversa nella regione P si ha una concentrazione di cariche negative. La regione di giunzione, ovvero la regione a contatto con entrambi gli strati vede l'accumulo delle cariche precedentemente descritte e si crea una barriera di potenziale (*campo di giunzione*) che si oppone ad un'ulteriore diffusione di ioni.

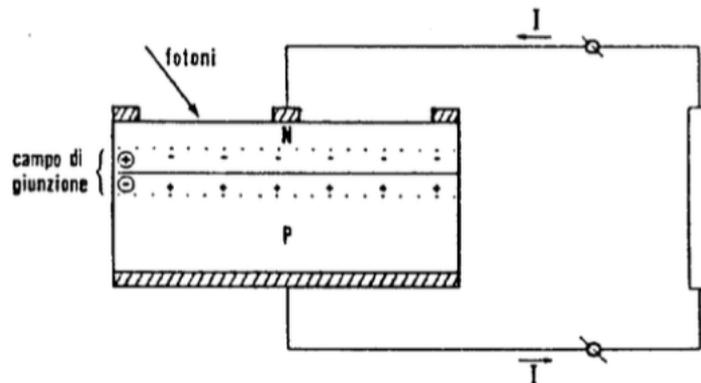


Figura 2.4: Giunzione P-N con accumulo di cariche

La condizione di equilibrio alla giunzione muta drasticamente se si applica un voltaggio esterno alla cella. Se la polarizzazione è diretta, ovvero positiva, e applicata al polo P,

si ha una diminuzione dell'altezza della barriera di potenziale e si genera la cosiddetta *corrente diffusiva*. Se invece la polarizzazione è inversa, ovvero negativa e applicata al polo N, la barriera di potenziale aumenta e si genera una corrente di basso valore chiamata *corrente di saturazione*, indicata in letteratura con I_o .

L'effetto fotovoltaico si ottiene quando i fotoni raggiungono la cella fotovoltaica. Se l'energia dei fotoni incidenti è superiore all' *Energy gap*, E_P , definita come il salto di energia tra banda di valenza e banda di conduzione, un elettrone viene promosso dalla banda di valenza a quella di conduzione lasciando indietro una lacuna: si è generata così una coppia elettrone-lacuna. Non tutti i fotoni hanno abbastanza energia da superare l'energy gap, l'energia in eccesso si disperde sotto forma di calore. Riassumendo per generare la corrente fotovoltaica sono necessarie due condizioni:

- che l'energia dei fotoni sia maggiore dell'energy gap, $E_{fotoni} > E_{Gap}$;
- la presenza del campo elettrico nella regione di svuotamento.

La corrente generata è direzionata dal campo elettrico sopra citato e gli elettroni si muovono verso la regione N, in un movimento di cariche che è opposto alla diffusione. Le principali perdite sono dovute: alla riflessione di alcuni fotoni o al fatto che colpiscono i collegamenti metallici (fingers e busbars), alla ricombinazione della coppia elettrone-lacuna, alle perdite Joule a causa della resistenza dell'elettrodo frontale e infine all'imperfetto isolamento delle superfici laterali della cella.

2.2.2 Il circuito equivalente della cella solare

Ai morsetti esterni [11], il comportamento della cella solare può essere schematizzato da un generatore ideale di corrente a cui è collegato un diodo reale in anti-parallelo. Il generatore di corrente è proporzionale all'irradianza:

$$I_{PH} = J_{PH} \cdot A = \int_{\lambda} S(\lambda)g(\lambda)d\lambda = K \cdot G \cdot A \quad (2.21)$$

dove:

- J_{PH} è la densità di corrente fotovoltaica, $[mA/cm^2]$;
- λ è la lunghezza d'onda della radiazione solare $[\mu m]$;
- K è un coefficiente che dipende dalla natura del materiale scelto per la cella;
- G è l'irradianza, $[W/m^2]$;
- A è l'area della cella, $[cm^2]$.

Per rendere il circuito più attinente alla realtà si introducono una resistenza collegata in parallelo R_{sh} e una in serie R_s . La prima resistenza corrisponde alla corrente di dispersione superficiale tra piastra e griglia, sulle superfici laterali della cella solare. Queste superfici, durante la fabbricazione della cella, sono rese, il più possibile, isolanti. La seconda contiene le perdite dovute ai contatti sulla superficie frontale, i fingers e i busbars. I contatti si dividono in busbars, che servono da collegamento tra le diverse celle, e in finger, ortogonali alle busbars, che raccolgono i contributi della corrente fotovoltaica prodotta su tutta la superficie della cella. Il circuito equivalente si presenta come segue:

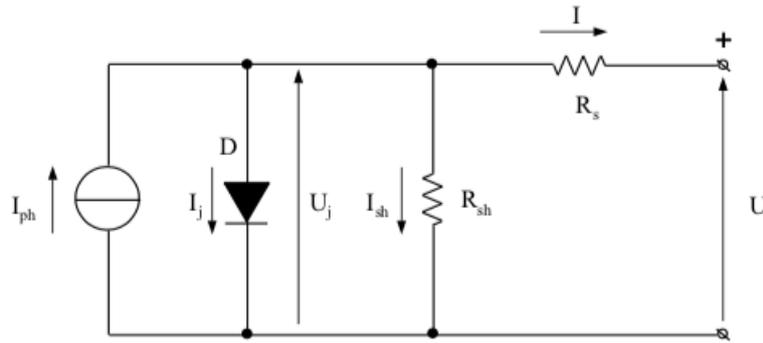


Figura 2.5: Circuito equivalente della cella solare

Per ridurre le perdite si dovrebbe verificare che R_{sh} tenda ad infinito così da avere la *leakage current* tendente a zero. Viceversa per eliminare le perdite dovute ai contatti frontali, occorre che la resistenza R_s tenda a zero. Siccome R_s è una resistenza in parallelo, se si collegano più resistenze, la resistenza equivalente tende sempre più verso zero. Infatti si collocano 3 busbars per ridurre quanto più possibile il termine R_s senza ridurre troppo la superficie attiva della cella, definita come la porzione della cella raggiunta dalla radiazione solare.

Applicando il teorema di Kirchoff per la corrente al nodo e la legge della maglia, è possibile calcolare i valori di I e di U :

$$I = I_{ph} - I_J - \frac{U_j}{R_{sh}} \quad (2.22)$$

$$U = U_J - R_s \cdot I \quad (2.23)$$

2.2.3 La curva caratteristica

Dal circuito equivalente è possibile ricavare la curva caratteristica della cella fotovoltaica, a temperatura e irradianza fissate. La curva presenta sull'asse delle ordinate la corrente in Ampere e sulle ascisse il voltaggio in Volt. Il valore massimo di corrente si presenta nelle condizioni di corto-circuito a cui corrisponde il valore minimo di tensione poiché si ha una condizione che corrisponde al circuito chiuso; il valore minimo della corrente si ha in corrispondenza della tensione di circuito aperto che invece è massima, poiché il bipolo è aperto e non può circolare corrente. Tra questi due punti si colloca il punto di massima potenza, ovvero il punto corrispondente alle coordinate I_M e U_W che rappresenta la potenza massima erogata al carico.

La caratteristica $I(U)$ completa della cella solare si estende nel I, II e IV quadrante. In questi ultimi due la cella funziona da utilizzatore rispettivamente a tensione inversa ($U_j < 0$) e a corrente inversa ($I_j < 0$). Tali condizioni sono accettabili solamente se i punti della curva ricadono sotto l'iperbole di massima potenza che rappresenta la potenza massima dissipabile dalla cella: oltre quel limite la temperatura sarebbe troppo alta e causerebbe la rottura della cella. Un altro limite presente solo nel II quadrante è rappresentato dalla tensione di *breakdown*, U_b in letteratura. Per le celle al silicio il valore è di circa qualche decina di Volt e, se superato, causa il danneggiamento irrimediabile della cella.

L'inserzione delle due resistenze descritte in precedenza ha delle ripercussioni sulla caratteristica $I(U)$. L'inserzione della resistenza R_{sh} in parallelo al generatore di corrente

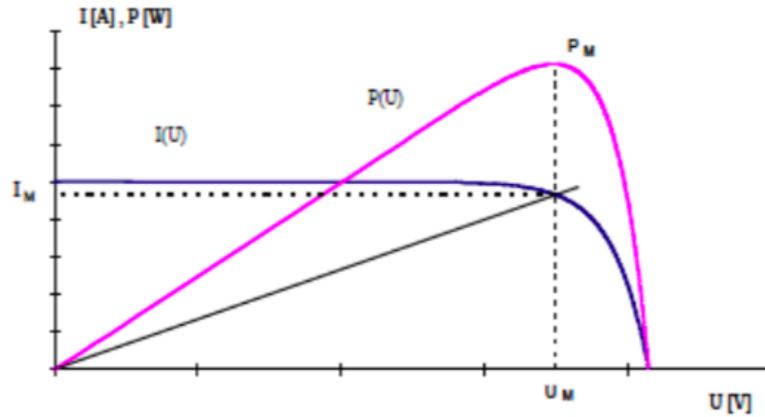


Figura 2.6: Caratteristica della cella solare e curva di potenza

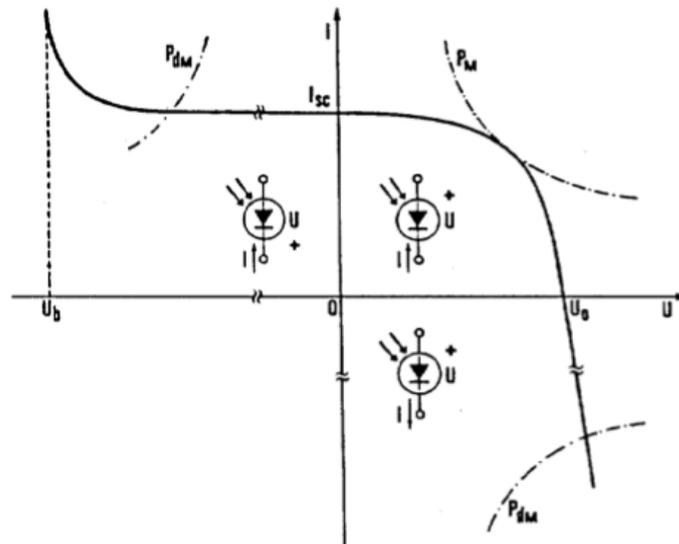


Figura 2.7: Caratteristica completa della cella solare

e al diodo si hanno i seguenti effetti: aumenta la pendenza (dI/dU) della curva $I(U)$ in corrispondenza della corrente di corto-circuito e diminuisce la tensione di circuito aperto U_{oc} . La resistenza R_s collegata in serie causa una diminuzione della pendenza (dI/dU) della curva $I(U)$ in corrispondenza della tensione di circuito aperto e la diminuzione della corrente di corto-circuito I_{sc} .

Le due resistenze sono due dei cinque parametri espliciti che descrivono la relazione $U(I,U)$, di tipo implicito, propria della cella fotovoltaica:

$$U = \frac{mKT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} - I\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - \frac{U}{R_{sh}} + I_o}{I_o}\right) - R_s I \quad (2.24)$$

dove:

- la resistenza in serie R_s ;
- la resistenza in parallelo R_{sh} ;
- la corrente fotovoltaica $I_{ph}=kGA$;

- la corrente di saturazione I_o , orientata dal campo di giunzione;
- la massa d'aria m , che varia tra 1 e 2.

Un altro parametro importante è il *Fill Factor* che rappresenta globalmente l'influenza del diodo e delle resistenze R_s e R_{sh} sulla caratteristica. Esso è definito come il rapporto tra la potenza al punto massimo e $U_{oc} \cdot I_{sc}$:

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.25)$$

Il *Fill Factor* è utilizzato come è un valore globale che può essere usato per confrontare celle costruite con diverse tecnologie. Per le celle al silicio cristallino si ha $FF=0,74-0,78$, mentre per le celle a film sottile $FF=0,5-0,6$.

La tensione non dipende linearmente dall'irradianza ma logaritmicamente. La corrente è direttamente proporzionale all'irradianza, tramite la formole $I_{ph}=kAG$, e siccome in condizione di corto-circuito la $I_{ph} \approx I_{sc}$ allora anche la forma della curva caratteristica dipende dall'irradianza:

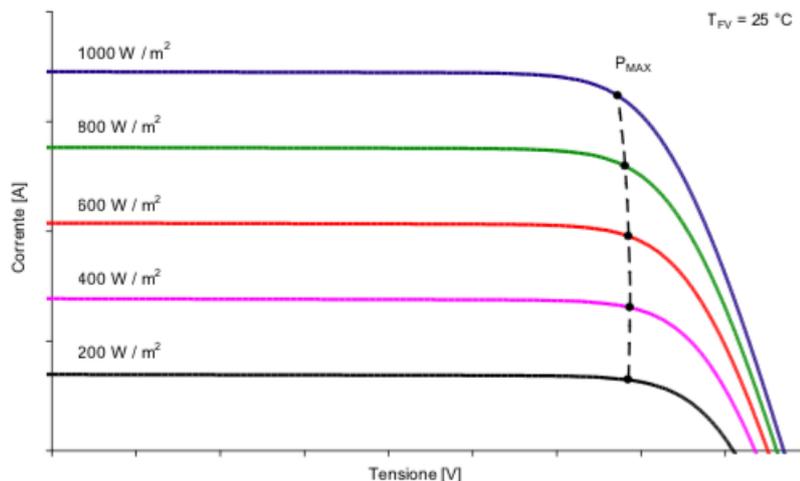


Figura 2.8: Curva $I(U)$ in funzione dell'irradianza alla temperatura di 25°C

Anche la temperatura ha effetto sulla caratteristica $I(U)$. In particolare un aumento della temperatura, ad irradianza costante, causa un lieve aumento della corrente fotovoltaica I_{ph} e quindi anche della corrente di corto circuito I_{sc} (o della densità di corrente J_{sc}), essenzialmente per la diminuzione dell'energy gap del materiale; con l'aumento della temperatura si ha anche un aumento della corrente I_j nel diodo, cui corrisponde una diminuzione della tensione a circuito aperto U_{oc} .

2.2.4 Definizione dei concetti di Autoconsumo e di Autosufficienza

Il 2011 è stato l'anno in cui si è registrato il picco di installazione di generatori fotovoltaici grazie agli incentivi favorevoli del 2010 pari a $0,407 \text{ e/kWh}$ [12]. Negli ultimi anni la corsa al fotovoltaico è scemata a causa del ribasso degli incentivi. Inoltre la tendenza è di dimensionare l'impianto per coprire quanto più possibili i picchi di energia durante la

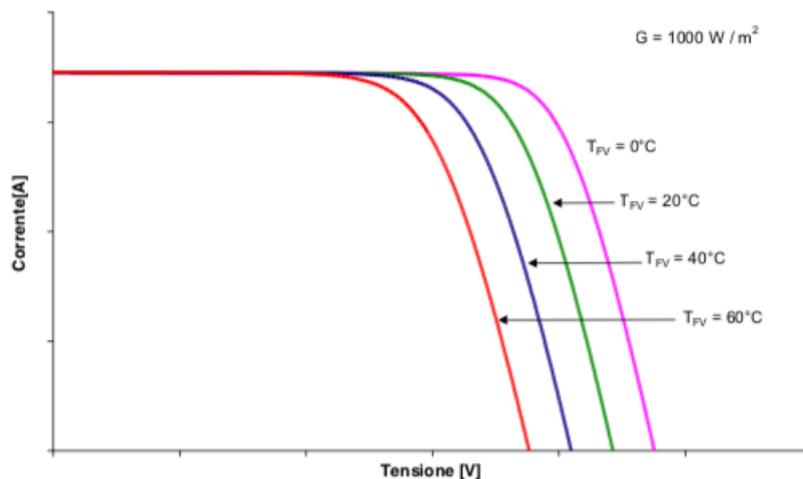


Figura 2.9: Curva $I(U)$ in funzione della temperatura, ad irradianza costante pari a 1000 W/m^2

giornata anche servendosi di accumulatori. I picchi di richiesta si manifestano al mattino dalle 07:00 alle 09:00 e alla sera dalle 18:00 alle 20:00, infatti coincidono con gli orari di rientro dagli uffici. Piuttosto che sovradimensionare l'impianto, si punta a coprire nel limite i picchi e ad accumulare energia durante il giorno: quando si ha il minimo nei carichi, si ha anche il massimo dell'irradianza nelle ore centrali della giornata. Durante la giornata si accumula energia che andrà a coprire i picchi alla sera e al mattino seguente.

Il concetto di *Autoconsumo* diventa centrale nella progettazione dell'impianto fotovoltaico. Per Autoconsumo si intende la quota di energia che non viene immessa nella rete di immissione e distribuzione dell'energia elettrica, ma che è consumata direttamente sul luogo di produzione [12]. Lo sfruttamento ideale della risorsa solare si dovrebbe basare sull'accoppiamento dei consumi elettrici dovuti ad elettrodomestici, pompe di calore, televisori ecc. con la produzione di energia elettrica. Tuttavia i profili di carico di utilizzo e produzione spesso differiscono in quanto la richiesta di energia è massima nelle ore mattutine e serali quando la produzione da fotovoltaico è minore; viceversa si ha alta disponibilità di energia nella fascia centrale della giornata quando l'energia non è richiesta. Il concetto di Autoconsumo si può vedere come un indicatore di qualità per l'accoppiamento tra la produzione e i carichi elettrici. Matematicamente è definito come il rapporto tra: a numeratore il minimo tra la produzione di energia da fotovoltaici e i consumi e a denominatore la produzione fotovoltaica:

$$AC = \frac{\min[P_{FV}; C_e]}{P_{FV}} [\%] \quad (2.26)$$

Dove P_{FV} è l'energia elettrica prodotta da fotovoltaico e C_e rappresenta i consumi elettrici.

Tuttavia il solo concetto di Autoconsumo non è sufficiente a definire completamente la qualità dell'accoppiamento tra produzione e consumi. L'altro concetto cardine è l'*Autosufficienza*, o *Auto-produzione*. L'autosufficienza rappresenta la quota di consumi che viene effettivamente ricoperto dalla produzione fotovoltaica. Infatti l'utilizzo del solo concetto di Autoconsumo può essere fuorviante: si può avere in una giornata nuvolosa un Autoconsumo del 100 % in quanto tutta l'energia da fotovoltaico è sfruttata, ma un' Autosufficienza bassa poiché la quota prodotta non è sufficiente a soddisfare i carichi.

Matematicamente l'Autosufficienza è definita come:

$$AS = \frac{\min[P_{FV}; C_e]}{C_e} [\%] \quad (2.27)$$

Vista l'intermittenza della risorsa solare e il disaccoppiamento tra produzione e consumi, l'idea per sfruttare al meglio la produzione è l'impiego di sistemi di accumulo. Per il fotovoltaico si impiegano accumuli elettrochimici come le batterie agli ioni di Litio.

Capitolo 3

Il modulo abitativo *Eco-home*

3.1 Descrizione del progetto *be-eco*

Il progetto *Eco-home* nasce da un'attività di ricerca all'interno della start-up *be-eco* che ha come sede attuale l'Incubatore delle Imprese Innovative , I3P, del Politecnico di Torino. Il progetto è focalizzato sugli ambiti specifici delle tecnologie costruttive in legno, dei sistemi di prefabbricazione leggera e della certificazione ambientale. Come suggerisce il nome, la filosofia alla base del progetto ha lo scopo di coniugare il confort e il risparmio energetico con il concetto di sostenibilità. In particolare quest'ultimo concetto riguarda l'utilizzo del materiale legnoso che deriva rigorosamente da filari boschive certificate *PEFCTM* . Per "certificazione della gestione forestale" si intende un attestato rilasciato da un organismo indipendente a seguito di una procedura di verifica collaudata e verificata con lo scopo di assicurare la sostenibilità della regione boschiva [13]. Tra le prescrizioni del *PEFCTM* sono di particolare interesse le seguenti: conservare la foresta come habitat per animali e piante , tutelare la biodiversità e prevedere il taglio delle piante rispettando il naturale ritmo di ricrescita della foresta.

Il legno è stato scelto come materiale per le sue ottime proprietà termiche e costruttive. Per quanto riguarda il primo aspetto , il legno grazie alla sua scarsa conducibilità e alla sua densità è in grado di trattenere l'aria all'interno dell' edificio così da limitare le perdite di calore verso l'esterno e al contempo permette di mantenere la temperatura ideale all'interno. Inoltre il legno offre un ottimale controllo dell'umidità in quanto la assorbe quando è in eccesso e la rilascia quando è in difetto , garantendo così il confort termico. Grazie alla sua naturale elasticità il legno è in grado di resistere a scosse di terremoto di notevole intensità , infatti la struttura del modulo abitativo è stata realizzata in collaborazione con l'azienda giapponese *Suteki Wood System*. Il modulo è in grado di sostenere scosse sismiche 1.25 volte maggiori dell'intensità registrata in Giappone durante il più grave terremoto (7.2 scala Richter). Una delle caratteristiche peculiari di questo sistema è l'uso di giunzioni in acciaio fuso al carbonio appositamente progettate per unire i componenti del telaio in legno, conferendo alla struttura una maggiore resistenza. Inoltre non vengono utilizzati bulloni, quindi non c'è pericolo che i bulloni si allentino mentre il legno si restringe: il telaio rimane stabile e resistente. Il legno utilizzato è legno lamellare che è classificabile come un materiale composito ottenuto incollando delle tavole di legno già classificate per uso strutturale. Esso mantiene i pregi del legno naturale (elevato rapporto tra resistenza meccanica e peso, lenta combustione in caso di incendio) e in aggiunta offre una maggiore stabilità e la mancanza di fenditure, anche a distanza di anni. Un aspetto molto importante è la resistenza al fuoco che può essere pari o

superiore persino a quella del calcestruzzo armato e dell'acciaio: ad un aumento molto lento della temperatura corrisponde una variazione della resistenza meccanica delle fibre di legno quasi trascurabile e il cedimento avviene perché la sezione della trave si è talmente assottigliata da non reggere il peso della struttura [14].

Un altro dei punti cardine del progetto *be-eco* è la perfetta integrazione del modulo con i sistemi energetici a fonte rinnovabili. Il consumo di energia elettrica è dovuto: alla pompa di calore, al riscaldamento mediante pannelli radianti elettrici, all'illuminazione e alla ventilazione. Per soddisfare i criteri che renderebbero il modulo classificabile come NZEB è necessario che il fabbisogno sia coperto quanto più possibile da fonti rinnovabili come il fotovoltaico; per soddisfare la domanda di acqua calda sanitaria si ricorre ad un kit per solare termico. Queste soluzioni rinnovabili sono offerte in tutte le proposte di moduli prefabbricati offerti da *be-eco*, ovvero: *Eco-home Plus*, *Eco-home Zero*, *Eco-home nature* che si differenziano principalmente per la classe energetica e il modello zero è quello che più si avvicina al concetto di nZEB poiché è certificato come una *passivhaus*.

3.2 Struttura del modulo

Il modulo è un prefabbricato, il che lo rende di facile e veloce installazione, realizzato principalmente in legno. Esso è costituito: dal corpo centrale a forma di semplice parallelepipedo avente le dimensioni di 17,28x6,57x3 m per un totale di 113,54 m², da due rampe di accesso per disabili sul fronte e sul retro del modulo e da due coppie di fioriere accanto alle rampe. L'accesso alla struttura è permesso da porte-finestre collocate lungo i lati dell'edificio secondo la seguente planimetria: Il modulo è diviso in quattro ambienti

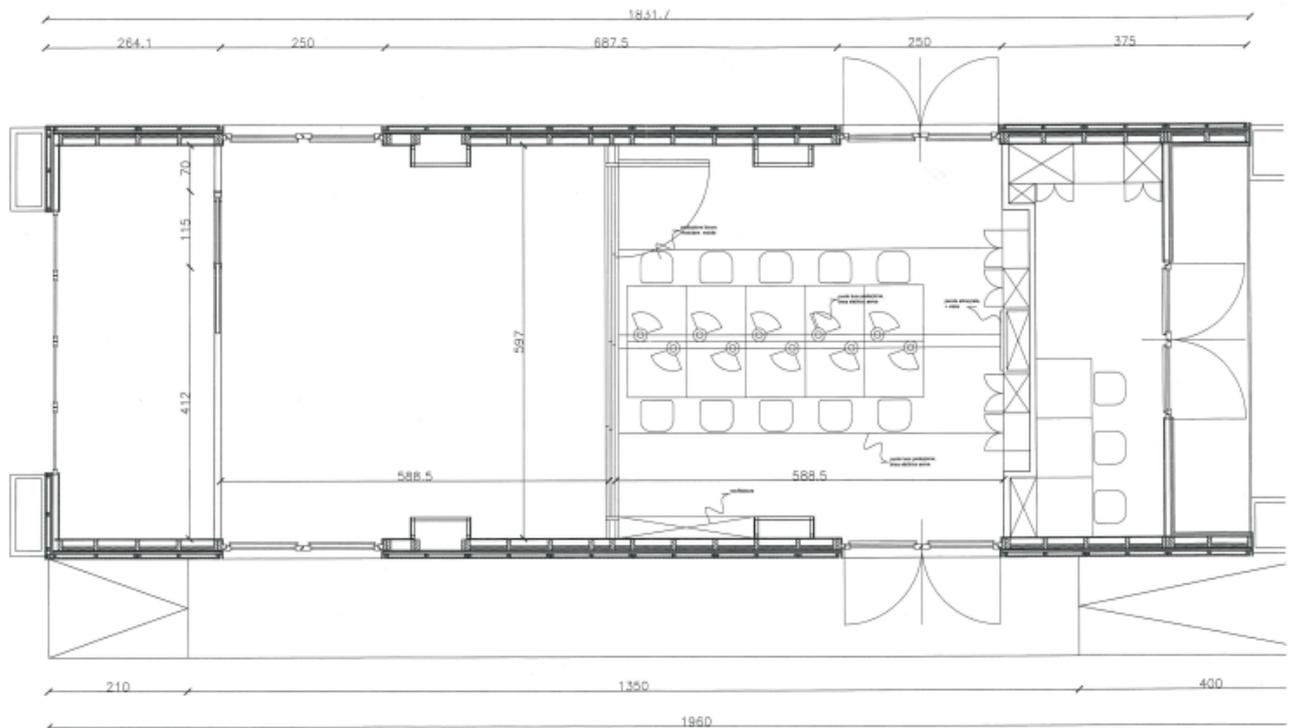


Figura 3.1: Planimetria modulo abitativo

:

- due aule studio gemelle aventi le stesse dimensioni, 5,88x5,97m ;
- un locale orientato Sud-Ovest con all'interno una sala tesi, anche detta Sala Controllo, misurante 2,641x5,97m
- l'ultima zona orientata Nord-Est è il Locale Tecnico che è sede delle batterie e dell'inverter e ha le stesse dimensioni della Sala Controllo.

I locali interni sono collegati da due porte a scorrimento e all'ingresso principale lungo il prospetto Nord-Ovest è collegata una rampa per consentire l'accesso ai disabili avente le dimensioni 4x 3,14 m . Essendo un modulo prefabbricato , le tempistiche di montaggio sono molto brevi , circa 1 mese. Durante l'ostensione della Santa Sindone il modulo operante da penitenziario è stato costruito da Nord Legami Ambiente con la collaborazione di altre 18 aziende che hanno partecipato come sponsor fornendo materiali e servizi a titolo gratuito.

3.2.1 Stratigrafia del modulo abitativo aggiornata

Per ottenere i valori desiderati di trasmittanza si sono svolte delle simulazioni con Energy Plus e si sono calcolati i nuovi valori sia per il componente opaco sia per quello trasparente. Gli interventi sono stati i seguenti:

- Per la copertura si è aggiunto un cappotto esterno di sughero tostato di 20 cm e si è lasciata l'intercapedine d'aria per permettere l'installazione dell'impianto elettrico;

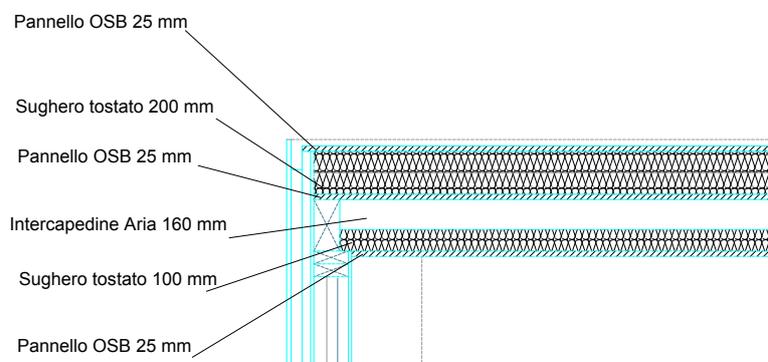


Figura 3.2: Stratigrafia Copertura aggiornata

- Per il solaio si è optato per lasciare l'intercapedine in modo che venga riempita con il sistema a pannelli radianti a tubi capillari e si è aumentato lo spessore di isolante per ottenere 20cm di sughero tostato;

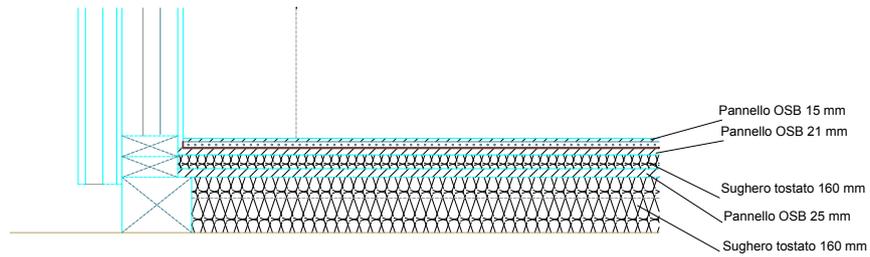


Figura 3.3: Stratigrafia Solaio aggiornata

- per le pareti più lunghe lato Sud-Est e Nord-Ovest si propone di mantenere la stratigrafia esistente, riempiendo però l'intercapedine d'aria con 10 cm di isolante di sughero tostato, in aggiunta ai 6 cm già presenti, mantenendo i 4 esterni;

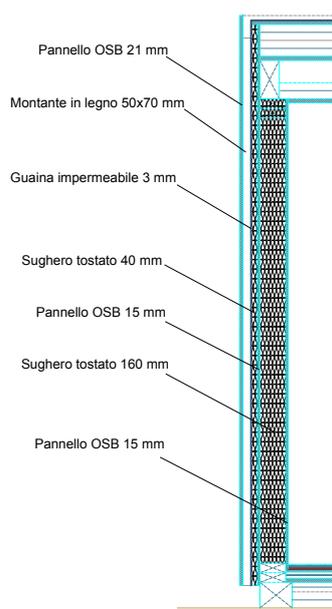


Figura 3.4: Stratigrafia pareti con esposizione Sud-Est e Nord-Ovest aggiornate

- per le pareti corte con il pannello in Crosslam si propone di aggiungere al cappotto esistente di 4 cm altri 20 cm di isolante;

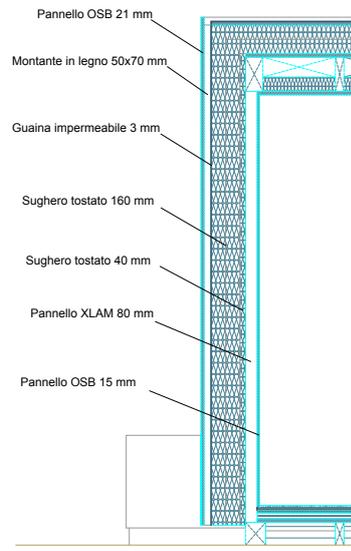


Figura 3.5: Stratigrafia parete con esposizione Nord-Est aggiornata

- per i serramenti si sono scelte porte finestre dotate di triplo vetro con aria nell'intercapedine. Il valore di trasmittanza termica è di $1,182 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ e ha il coefficiente di trasmissione solare pari a 0,02. Vi sono due tipi di porte finestre:

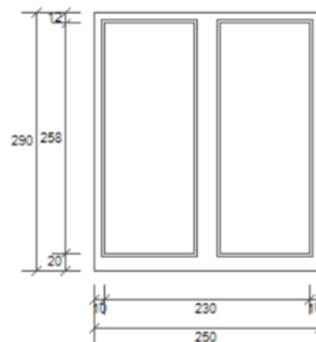


Figura 3.6: Serramento a doppia anta

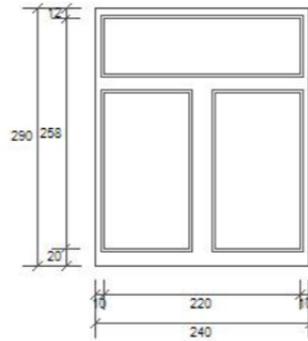


Figura 3.7: Serramento porta finestra

3.2.2 La tecnologia Naturwall

La tecnologia Naturwall è un progetto brevettato e sviluppato all'interno dell'attività di ricerca del Dipartimento di Architettura (DAD) del Politecnico di Torino; in seguito è diventato un concetto chiave all'interno della start-up *be-eco*. L'obiettivo è di aumentare l'efficienza energetica dell'edificio andando ad operare sull'involucro dello stesso e come diretta conseguenza diminuiscono le emissioni di gas serra. E' importante aggiungere che questa tecnologia può essere anche adoperata per il retrofit di edifici esistenti costruendo un cappotto che avvolge l'edificio già esistente: nel dettaglio si dovrebbe ottenere una riduzione del consumo energetico [15] del 75 % per quanto riguarda la facciata, per l'interno la riduzione è del 30 % insieme ad una riduzione dei rumori interni del 40 %. L'aspetto ecologico è centrale poiché i materiali sono tutti riciclabili e il ciclo di vita del componente è chiuso.

Il modulo finora concepito e testato è composto da materiali naturali e a basso costo, come legno e cartone, e ha una struttura in legno e un assemblaggio costituito da una vetrata stratificata esterna (3 + 3 mm), una cavità naturale ventilata (40 mm) con un materiale a nido d'ape (30 mm) e un pannello sandwich coibentato (98,9 mm). Il modulo Naturwall può essere posizionato nell'involucro esistente tra le travi strutturali fissate ai solai.

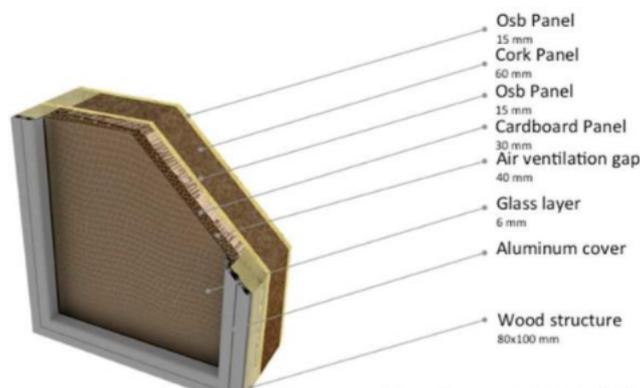


Figura 3.8: Stratigrafia pannello Naturwall

E' interessante evidenziare il comportamento energetico dei pannelli in inverno e in estate. Durante l'inverno il pannello opera come un collettore solare: sfrutta la radiazione

solare che colpisce la vetrata e che viene raccolta dalla struttura a nido d'ape. Il pannello di cartone è stato applicato nel sistema per ottimizzare il guadagno di calore solare e per far sì che i raggi solari colpiscano la superficie del sistema. La forma del nido d'ape è stata definita per massimizzare il guadagno di calore solare durante l'inverno e per offrire ombra dalla radiazione solare estiva. Inoltre, il componente, grazie alla sua forma, è in grado di ridurre il trasferimento del calore convettivo. Viceversa durante l'estate il calore accumulato viene parzialmente asportato mediante lo sfruttamento della ventilazione naturale nella cavità del pannello.



Figura 3.9: Comportamento energetico del pannello

3.3 Posizionamento del modulo

Il sito scelto per ospitare il modulo è il giardino sopra le aule I e adiacente alla facciata laterale dell'edificio I3P; il sito si trova nella zona definita "cittadella politcnica", ovvero l'area del Politecnico di Torino compresa tra Corso Castelfidardo e Via Pier Carlo Boggio. Le esatte coordinate sono:

- Latitudine : 45.0657 N;
- longitudine : 7.6584 E.

E' possibile un solo orientamento del modulo in accordo con l'orientazione del giardino verso Nord-Ovest, con un angolo di inclinazione rispetto all'asse Nord di circa 30°. Il modulo è suddiviso in quattro ambienti:

- una Sala Controllo con tre postazioni dotate di computer usata per monitorare le prestazioni energetiche del modulo e dei pannelli fotovoltaici. L'esposizione della sala è Sud - Ovest e le sue dimensioni sono 264,1 x 657 cm per un'area di 17,35 m^2 ;
- due sale studio aventi le stesse dimensioni e le stesse caratteristiche termofisiche. La planimetria è stata pensata per avere le stesse condizioni termiche e di esposizione nelle due sale studio collocando i due locali di area minore ai lati per creare una sorta di cuscinetto. Inoltre i due ambienti sono divisi da una parete che può essere ripiegata su sè stessa per creare un ambiente unico. Le dimensioni nette del locale sono 588,5 x 597 cm per un' area netta di 35,13 m^2 per ogni locale;
- l'ultimo locale è adibito a locale tecnico contenente Inverter e Batterie. Si è deciso di collocare qua le attrezzature per bilanciare l'esposizione meno favorevole rispetto alla Sala Controllo, Nord-Est del locale tecnico contro Sud-Ovest della Sala Controllo: per compensare questo aspetto si punta sul calore prodotto dalle apparecchiature. La dimensione del locale è analoga a quella della Sala Controllo.

Capitolo 4

Metodologia

4.1 Modellazione del modulo

Per modellare il modulo abitativo e gli elementi schermanti si è fatto uso del software SketchUp e del suo plug-in Open Studio. SketchUp permette di creare un modello 3D dell'edificio che si vuole analizzare e di collocarlo geograficamente nell'area di interesse. Le proprietà termo-energetiche devono essere inserite tramite i comandi di OpenStudio, in particolare per le analisi successive è fondamentale la divisione dell'edificio in zone termiche. Queste sono definite dalla UNI TS 11300-1 come porzioni di edificio, climatizzate ad una determinata temperatura con identiche modalità di regolazione. Nel caso in esame il modulo è stato diviso in quattro zone termiche: tramite il comando *New Zone* è possibile disegnare i confini della zona voluta e poi tramite estrusione si ottiene l'edificio di altezza desiderata; l'edificio risulta correttamente diviso in zone termiche se i muri appaiono di colore arancione, la copertura di colore rosso e il solaio grigio. Per controllare la buona riuscita della progettazione è possibile ricorrere allo strumento *Inspector* che consente l'accesso al nome della zona termica e alle sue coordinate. Le zone termiche sono state assegnate nel seguente modo:

- zona termica 1 corrisponde alla Sala Controllo;
- le zone termiche 2 e 3 sono assegnate alle due aule studio gemelle;
- l'ultima zona , la 4, è stata assegnata al locale tecnico.

In seguito per consentire al software di riconoscere le pareti interne si è usato lo strumento *Interior Partition Group* tramite cui si è impostato lo spessore della parete divisoria tra gli ambienti di 20,5 cm. Tramite il comando *Surface Matching* è possibile accoppiare le pareti di due zone termiche: si selezionano le zone di interesse e si procede prima all'intersezione delle superfici e poi al matching. Si può verificare se l'operazione è andata a buon fine se, selezionando la voce *Render By Boundary Condition*, le superfici appaiono di colore verde. Questa operazione è fondamentale perché consente al software di riconoscere che le due zone si scambiano tra loro calore, altrimenti si trascurerebbero gli scambi termici tra le zone termiche accoppiate commettendo un errore.

L'orientamento del modulo è stato reso possibile sfruttando la funzione di Geo localizzazione di SketchUp. Dalla voce *File* si risale a *Geo-location* che sfrutta le mappe di Google per ottenere la vista del sito in esame. Ottenuta la cartografia, si è considerato 1,80 metri di distanza dalla ringhiera presente sopra le aule I e si è collocato il modulo inclinato di 26 gradi rispetto al Nord. SketchUp permette di visualizzare le direzioni

cardinali indicando il Nord in verde, l' Est in rosso, il Sud e l' Ovest rispettivamente in rosso e verde tratteggiato.

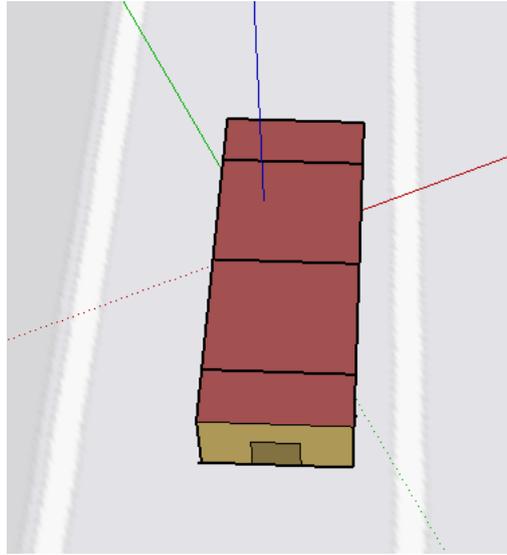


Figura 4.1: Vista del modulo su SketchUp

4.2 Modellazione degli ostacoli e dell'ombreggiamento

Nel sito in esame il principale ostacolo è costituito dal muro dell'edificio I3P. Modellare le ombre è fondamentale sia per il fotovoltaico che ne risente nella producibilità sia per gli apporti solari gratuiti che sul modulo di cui si tiene conto nella simulazione termo-energetica. Nel caso studio in esame si sono utilizzati due metodi diversi per generare gli ostacoli: il primo per riprodurre la parte dei I3P, il secondo per i pannelli fotovoltaici. Nel primo caso si è sfruttato il comando *New Shading Surface Group* che genera un muro di colore viola di default; le dimensioni si sono ricavate dal file DWG fornito dal dipartimento EDILOG : con il comando DIM su autocad si è quotata l'altezza della parete di 10 metri, mentre la lunghezza non è stata rappresentata nella sua interezza ma solo nella quota ritenuta sufficiente per avere un ombreggiamento realistico su tutto il modulo, quindi il valore è di 91,35 m.

Per quanto riguarda le stringhe fotovoltaiche si è scelto di creare la superficie schermante all'interno della zona termica su cui sono montati i pannelli. Questo passaggio permette di associare il pannello alla zona e fa sì che i moduli possano proiettare solo ombre nell'emisfero verso cui sono rivolti. Si sono considerati i moduli come elementi schermanti sia per considerare l'ombreggiamento tra le stringhe stesse sia perché esse sottraggono quote di apporti solari gratuiti. In questo caso il colore di default delle superfici è azzurro.

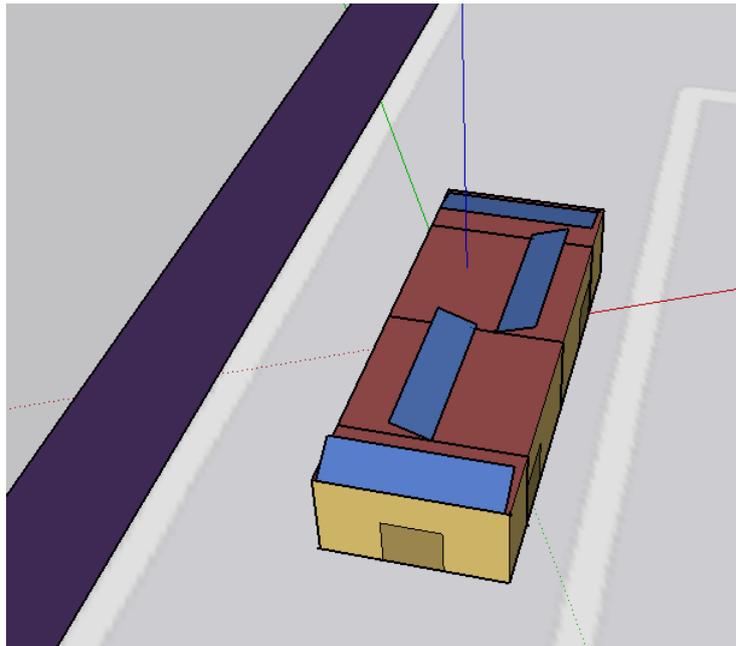


Figura 4.2: Rappresentazione degli elementi schermanti

Tramite la funzione *Shadows Setting* è possibile impostare il giorno, il mese e l'orario per ottenere l'evoluzione dinamica delle ombre durante l'arco della giornata. Si può infatti selezionare la data desiderata e variare l'orario per avere un'idea qualitativa dell'effetto degli ostacoli. Per esempio se si imposta come data il 20 Maggio alle ore 15:35 si ottiene la seguente configurazione:

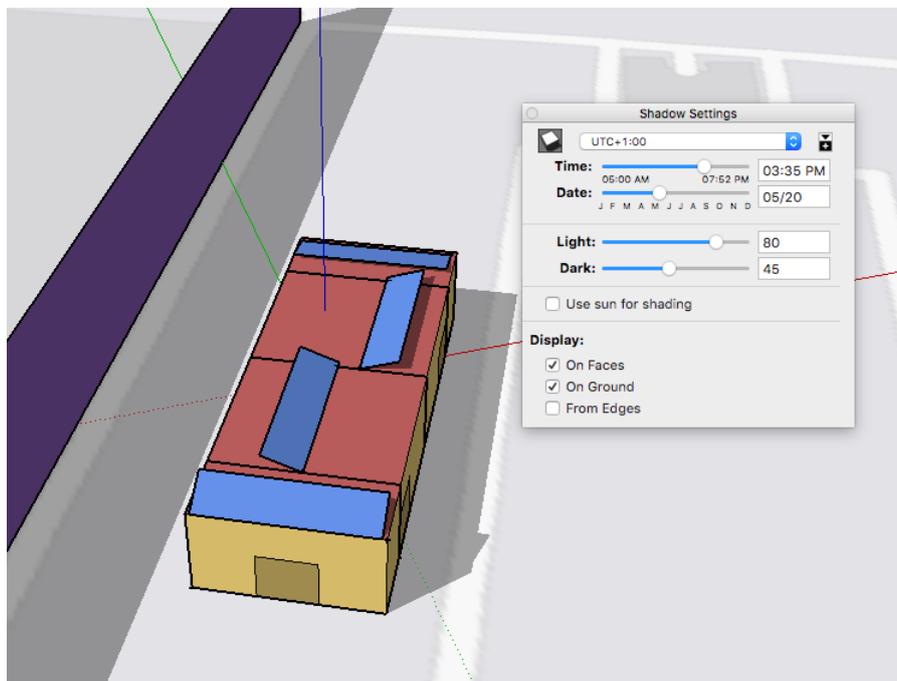


Figura 4.3: Vista delle ombre ad una data selezionata

4.3 Simuazione termo-energetica

Una volta conclusa la costruzione del modello su SketchUp e OpenStudio, si ottiene in output un file in formato .IDF, *Input Data File*, che è leggibile da Energy Plus. Questo è il software usato per la simulazione termo-energetica poiché permette di modellare tutti gli aspetti inerenti alla sfera termotecnica dell'edificio come il sistema di riscaldamento, di raffrescamento, la ventilazione, gli apporti interni. Di seguito si analizzeranno tutte le voci che permettono una simulazione quanto più precisa possibile.

Le prime voci dell'interfaccia riguardano le informazioni di base per la simulazione. La localizzazione e l'orientamento del modulo sono state estratte direttamente da SketchUp, il *TimeStep* deve essere specificato dall'utente a seconda del grado di dettaglio voluto dalla simulazione: i valori vanno da 1 a 60 e più alto il valore maggiore è la divisione dell'intervallo, per esempio se inserisco il numero 6, implica una suddivisione dell'ora in 6 sottointervalli quindi 10 minuti. Successivamente si è specificato un periodo di simulazione di un anno dallo 01/01 al 12/31 in modo da tenere in considerazione sia la stagione estiva sia quella invernale per valutare i fabbisogni rispettivamente di raffrescamento e di riscaldamento. E' possibile specificare il giorno di inizio dell'anno e si è deciso di scegliere Martedì per simulare l'anno 2019.

4.3.1 Il file meteo e il concetto di anno tipo

I dati meteorologici del sito in esame sono necessari per la valutazione dei fabbisogni medi di raffrescamento e riscaldamento dell'edificio. La costruzione del file meteo si basa sul concetto di anno tipo che consiste in 12 mesi caratteristici scelti da un database di dati meteorologici di un periodo che dovrebbe essere preferibilmente ampio almeno 10 anni. Per l'analisi si fa riferimento alla norma europea UNI EN ISO 15927-4, *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling* Un anno caratteristico, avendo lo scopo di essere utilizzato nel calcolo del consumo energetico annuale medio, deve rappresentare i valori medi dei più importanti parametri climatici [16]. Dovrà quindi essere:

- rappresentativo dei valori medi dei principali parametri meteorologici più vicini possibile ai valori medi calcolati su lungo tempo;
- caratteristico delle dinamiche reali del sito in esame ;
- rappresentazione della reale correlazione tra diversi parametri, specialmente temperatura e radiazione solare. Quindi il valore medio delle singole variabili, la loro distribuzione di frequenza e le correlazioni tra le diverse variabili all'interno di ogni mese devono essere più vicine possibile a quelle del mese corrispondente in tutto l'arco degli anni di dati, cioè ai dati di lungo termine [17].

I mesi che compongono l'anno tipo possono appartenere tutti ad uno stesso anno ma ciò è poco probabile, quindi si tende a scegliere il mese rappresentativo da anni diversi per poi unirli insieme. Tuttavia bisogna prestare attenzione alle transizioni tra i vari mesi perché appartenendo ad anni diversi, i mesi possono presentare dei salti improvvisi tra di loro che non rappresentano le reali condizioni climatiche. Per esempio la temperatura tra l'ultimo giorno di un mese e il primo del seguente solitamente presenta un salto di 1 o 2 °C, ma se si accoppiano semplicemente i mesi come descritto in precedenza il salto

può essere anche di 5-6 °C. Si aggiustano le transizioni togliendo i primi e gli ultimi otto valori di ogni mese e si sostituiscono con valori ricavati da interpolazione. Da sottolineare che il mese di febbraio si considera sempre costituito da 28 giorni.

L'anno tipo deve contenere un record di 8760 valori per le principali grandezze necessari al calcolo dei fabbisogni: la temperatura di bulbo secco [°C], la radiazione solare [W/m^2], l'umidità relativa [%] e la velocità del vento [m/s] che però è considerato un parametro secondario per le simulazioni termo-energetiche. Per ognuno di questi parametri si procede prima al calcolo della media giornaliera, in seguito si ricavano parametri statistici come quello di Finkelstein-Schafer che servono a ricavare lo scostamento tra il parametro in esame e il suo valore reale per ogni anno. I mesi con i valori di FS più bassi sono i mesi che più si avvicinano alla media, quindi sono quei mesi che hanno meno valori estremi.

Dal sito di Energy Plus è possibile scaricare il file meteo alla voce *Weather File* e per Torino si hanno due possibili scelte : Torino-Caselle 160590 (IGDG) e Torino 160590 (IWEC). Il primo è stato sviluppato dall'IFA (Istituto di Fisica dell'Atmosfera) del CNR condotto all'interno del Progetto Finalizzato Energetica nel 1979 e usa come record di dati climatici quelli dal 1951 al 1970. Il secondo è frutto di uno studio dell' ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers* che ha raccolto i dati in un periodo di 18 anni, dal 1982 al 1999; per il caso studio si è optato per il secondo file. Tramite l'applicazione di *Preprocess Weather Converter Program* è possibile convertire il file EPW in CSV da cui è possibile sia ricavare tutti i dati climatici per l'anno tipo sia estrapolare gli anni scelti per costruire i mesi tipo. Si sono ottenuti i seguenti risultati:

Costruzione anno tipo	
Mese	Anno
Gennaio	1986
Febbraio	1992
Marzo	1983
Aprile	1999
Maggio	1995
Giugno	1994
Luglio	1988
Agosto	1986
Settembre	1986
Ottobre	1984
Novembre	1995
Dicembre	1993

Tabella 4.1: Associazione dei mesi all'anno scelto

Il file contiene anche tutti i valori necessari per la simulazione termo-energetica: la temperatura di bulbo secco [°C], la temperatura di rugiada [°C], l'umidità relativa [%] , tutte le componenti della radiazione quindi extra-terrestre, diretta, diffusa, globale orizzontale W/m^2 , l' intensità e direzione del vento ma anche i dati relativi alle precipitazioni sia piovose sia nevose.

4.3.2 Definizione delle Schedules

La voce *Schedule* consente realizzare una dettagliata programmazione di molteplici elementi che riguardano la simulazione: l'occupazione delle persone, l'utilizzo delle luci e degli apparecchi elettrici, il controllo termostatico, per citarne alcuni.

Lo strumento utilizzato per la simulazione è la *Schedule Compact* che permette di generare un profilo di utilizzo per la variabile di interesse in modo compatto in una singola riga di comando [18]. Le voci di colore blu che compaiono a lato necessitano dell'inserimento di un dato, in questo caso del nome della schedule. Nella riga successiva si fa riferimento alla classe *Schedule Type Limits Name* che fa riferimento all'oggetto *ScheduleTypeLimits*. Quest'ultima permette di definire l'intervallo di funzionamento delle variabili, impostando manualmente i valori estremi di massimo e minimo. Inoltre si può definire il tipo di variabile numerica che si può usare, discreta o continua, e infine l'unità di misura che verrà poi riportata nella schedule: si può scegliere tra temperatura, potenza, grandezza adimensionata, livello di attività, percentuale ecc.

La *Schedule Compact* deve essere generata in modo da ricoprire ogni giorno dell'anno e ogni ora del giorno. Questa operazione è possibile grazie all'uso di vari comandi. Tramite il comando *Through* si inserisce la data di termine di un processo: se si imposta *Through 04/25*, significa che il parametro in studio assumerà i valori impostati fino al 25 di aprile, in questo esempio. Ogni volta che si utilizza questo comando, si crea un nuovo campo alla voce *Schedule Week* con il nome "*ScheduleName*"_{numero}.

Una volta inserita l'intervallo di mesi con il comando *Through* è necessario impostare per quali tipologie di giorni si applicano i dati inseriti tramite il comando *For*. La tipica divisione che si imposta è quella tra i giorni feriali e quelli festivi: per i primi si utilizza la parola chiave *Weekdays* e comprende i giorni da lunedì a venerdì; per i secondi si applica *Weekends* che comprende i giorni del fine settimana. Oltre a questa distinzione, si può fare riferimento ai giorni di vacanza usando la parola *Holidays* che si può applicare sia ai giorni lavorativi sia a quelli feriali; grazie a quest'ultimo è possibile impostare le pause vacanziera come i periodi estivi ed invernali. Si possono anche definire le schedules per il giorno di progetto invernale ed estivo, rispettivamente attraverso i comandi *WinterDesignDay* e *SummerDesignDay*. Questi due giorni di progetto sono il riferimento per il dimensionamento degli impianti come la pompa di calore di questo caso studio. Il mese e il giorno di progetto si scelgono alla voce *SizingPeriod: DesignDay* a cui si associano le schedules descritte in precedenza.

Infine resta da definire l'intervallo orario durante il quale il parametro assume un valore costante. Ciò è possibile attraverso il comando *Until*, la cui sintassi è la seguente: *Until 12:00* significa che il parametro assume un certo valore fino alle ore 12:00. Nella riga successiva si deve anche specificare il valore che assume il parametro. Per quanto riguarda l'occupazione delle sale, il funzionamento delle luci e degli apparecchi elettronici si è scelto come tipologia *Fraction*: i valori spaziano tra 0 e 1 per cercare di creare un profilo che rispecchi l'andamento giornaliero del parametro in esame.

Object Description: Irregular object. Does not follow the usual definition for fields. Fields A3... are:
 Through: Date
 For: Applicable days (ref: Schedule:Week:Compact)
 Interpolate: Average/Linear/No (ref: Schedule:Day:Interval) -- optional, if not used will be "No"
 Until: <Time> (ref: Schedule:Day:Interval)
 <numeric value>
 words "Through","For","Interpolate","Until" must be included.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		PERSONE AULA STUDIO	PROIETTORE	PERSONE SALA CONTROLLO	LUCI SALA CONTR
Schedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	Fraction	Fraction
Field 1	varies	Through: 01/07	Through 01/07	Through 01/07	Through 01/07
Field 2	varies	For: AllDays	For AllDays	For AllDays	For AllDays
Field 3	varies	Until 24:00	Until 24:00	Until 24:00	Until 24:00
Field 4	varies	0	0	0	0
Field 5	varies	Through: 04/18	Through 04/18	Through 04/18	Through 04/18
Field 6	varies	For: Weekdays	For Weekdays	For Weekdays	For Weekdays
Field 7	varies	Until 08:30	Until 08:30	Until 08:30	Until 08:00
Field 8	varies	0	0	0	0
Field 9	varies	Until 10:30	Until 19:00	Until 12:30	Until 19:30
Field 10	varies	.5	1	1	1
Field 11	varies	Until 12:30	Until 24:00	Until 14:00	Until 24:00
Field 12	varies	1	0	1	0
Field 13	varies	Until: 14:00	For Weekends	Until 19:00	For Weekends
Field 14	varies	.3	Until 24:00	1	Until 24:00
Field 15	varies	Until: 19:00	0	Until 24:00	0
Field 16	varies	1	Through 04/25	0	Through 04/25
Field 17	varies	Until: 24:00	For AllDays	For Weekends	For AllDays
Field 18	varies	0	Until 24:00	Until 24:00	Until 24:00
Field 19	varies	Through: 04/25	0	0	0

Figura 4.4: Vista della voce Schedule su Energy Plus

Per le variabili di interesse si specificano le scelte effettuate:

- Per quanto riguarda l'occupazione delle sale studio si sono considerati come periodi di vacanza i primi 7 giorni di Gennaio, le vacanze pasquali dal 18/04 al 25/04, le vacanze estive dal 01/08 al 31/08 e le vacanze invernali dal 23/12 al 31/12. Durante i giorni di vacanza l'occupazione delle aule è stata assunta pari a 0. Per quanto riguarda il profilo giornaliero, si è pensato come orario di apertura 08:30-19:00. Si è inoltre supposto che l'affluenza fino alle 10:30 sia del 50 %, durante la pausa pranzo 12:30-14:00 il 30 % e nelle restanti ore il 100 %. Il numero massimo di persone per ogni aula studio è stato imposto a 10 e per la Sala Controllo 3. Per quest'ultima un profilo di carico diverso: si è considerata la sala occupata sempre al 100 %;
- per i proiettori presenti nelle due aule studio si è ipotizzata una schedule semplificata che ipotizza un funzionamento costante dalle 08:30 alle 19:00. Si è effettuata questa scelta perché l'effettivo funzionamento dei proiettori dipende da numerosi fattori e non è possibile stabilire un profilo preciso;
- per le luci si è pensato di associarvi la schedule che riguarda l'occupazione delle persone, ipotizzando che ogni studente abbia associata una propria lampada a LED.

4.3.3 Implementazione dei dati di Input

In questa sezione si analizzano le scelte effettuate per i dati di input. Per dati di input si intendono: le proprietà termofisiche dei materiali, la stratigrafia, gli apporti interni, la ventilazione e le infiltrazioni. Per ognuno di questi parametri si è specificato quando il valore è ipotizzato e quando invece è da riferirsi ad una normativa.

4.3.3.1 Definizione della stratigrafia

In questo paragrafo si discute dell'implementazione della stratigrafia sul software Energy Plus. La descrizione della stratigrafia è riportata nel paragrafo 3.2.1, in questo si discuterà dei materiali che compongono la stratigrafia e di come è stata implementata. Le proprietà termofisiche dei materiali sono stati estrapolati dalla tesi di Chiara Galleri [19].

Materiali	Conducibilità [W/mK]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kgK]	Rugosità
Lastra in gessofibra	0,32	1150	1100	medio liscio
Pannello in fibra di legno	0,038	55	2100	medio liscio
Sughero Tostato	0,039	110	1900	medio rugoso
Pannello XLAM	0,13	500	1800	medio liscio
Guaina Impermeabile	0,17	1200	920	medio liscio
Pannello OSB	0,12	640	1700	medio liscio
Sughero MD	0,043	130	1900	medio rugoso

Tabella 4.2: Proprietà termofisiche dei materiali

Queste proprietà sono state inserite in Energy Plus sotto la voce *Material* dove si è specificato anche lo spessore dello strato:

The screenshot shows the Energy Plus software interface. On the left, a 'Class List' pane shows various object classes, with 'Material' selected. The main window displays 'Comments from IDF' and 'Explanation of Object and Current Field'. Below this, a table lists material properties for objects Obj26 through Obj31. The table includes columns for Field, Units, and specific property values for each object.

Field	Units	Obj26	Obj27	Obj28	Obj29	Obj30	Obj31
Name		Lastra in gessofibra	Pannello in fibra di legno	Sughero tostato 40	Sughero tostato 60	Sughero tostato 100	Pannello XLAM
Roughness		MediumSmooth	MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumSmooth
Thickness	m	.0125	.06	.04	.06	.1	.08
Conductivity	W/m-K	.32	.038	.039	.039	.039	.13
Density	kg/m3	1150	55	110	110	110	500
Specific Heat	J/kg-K	1100	2100	1900	1900	1900	1600
Thermal Absorptance							
Solar Absorptance							
Visible Absorptance							

Figura 4.5: Interfaccia di Energy Plus per l'inserzione dei materiali

Per quanto riguarda l'intercapedine d'aria si è supposto di considerarla come non ventilata ovvero un'intercapedine ove il flusso d'aria è nullo. Grazie ad una tabella che relaziona lo spessore dell'intercapedine con la direzione del flusso termico è stato possibile ricavare la resistenza termica in m^2K/W dell'intercapedine. Per quanto riguarda la copertura si è considerato il flusso come diretto verso l'alto poiché nel caso invernale il

flusso sarebbe uscente, viceversa per il solaio mentre per le pareti si è considerato come orizzontale:

Spessore dell'intercapedine, mm	Direzione del flusso termico		
	Verso l'alto	Orizzontale	Verso il basso
0	0.00	0.00	0.00
5	0.11	0.11	0.11
7	0.13	0.13	0.13
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.16	0.18	0.18
50	0.16	0.18	0.21
100	0.16	0.18	0.22
300	0.16	0.18	0.23

Nota: valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare.

Figura 4.6: Resistenza termica di intercapedini d'aria non ventilata con superfici ad alta emissività

Nel caso in cui lo spessore dell'intercapedine non sia presente nella tabella è sufficiente interpolare. I valori scelti sono stati inseriti su Energy Plus sotto la voce *Material:AirGap* dove è necessario inserire il nome dell'oggetto e il valore della resistenza termica.

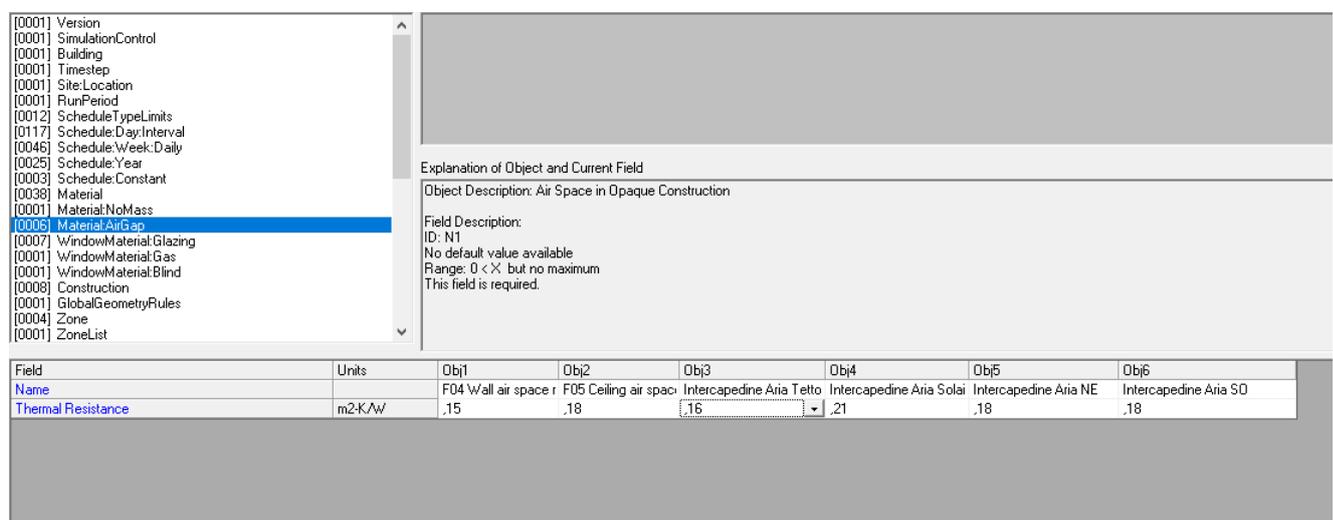


Figura 4.7: Interfaccia di Energy Plus per la definizione termotecnica dell'intercapedine d'aria

Una volta completata la sezione *Material*, bisogna specificare la stratigrafia alla voce *Construction*. Ogni parete ha il suo nome proprio e sono state nominate in base alla loro esposizione rispetto ai punti cardinali. I materiali sono stati ordinati dall'esterno verso l'interno e in Energy Plus appare come segue:

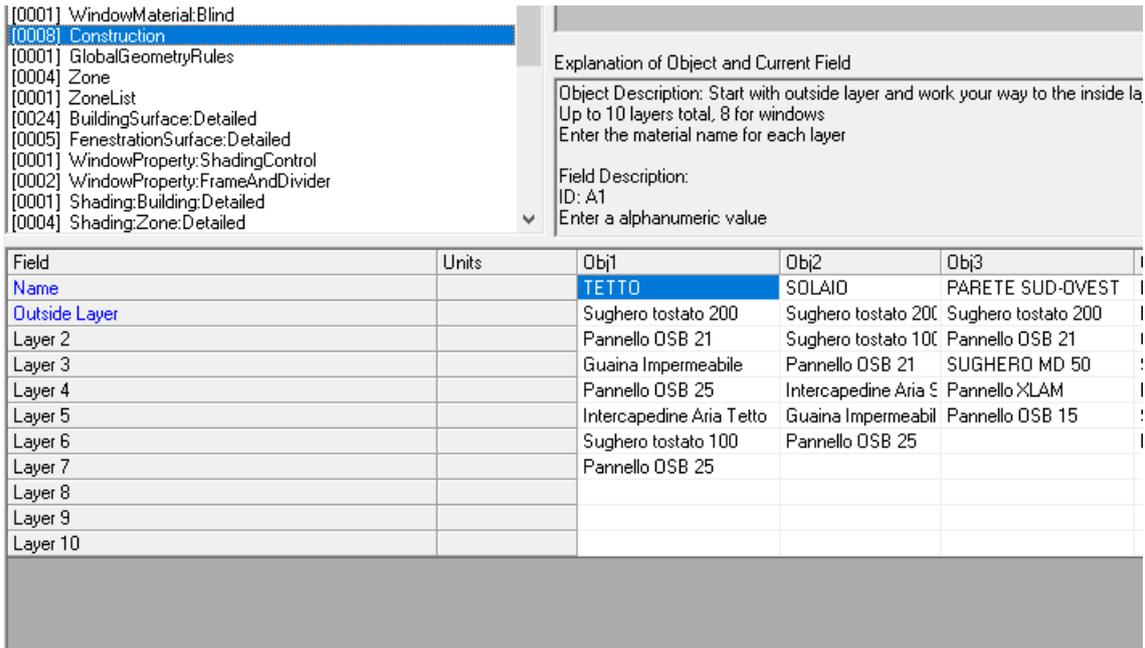


Figura 4.8: Interfaccia di Energy Plus per la costruzione della stratigrafia

L'ultimo passaggio riguarda l'assegnazione della stratigrafia alle pareti del modulo abitativo alla voce *Building Surface: Detailed*. Quando si salva il modello su SketchUp in formato .IDF, Energy Plus legge automaticamente le informazioni riguardanti le pareti che costituiscono le zone termiche. Pertanto si avrà in immediato la distinzione tra le pareti verticali, le pareti interne, la copertura e il solaio e l'assegnazione delle superfici alla zona termica di riferimento. Alla voce *Construction Name* si associa la stratigrafia definita nel passaggio precedente, questo per ogni componente. Anche le condizioni al contorno sono estrapolate direttamente da SketchUp e OpenStudio: per le pareti esterne e la copertura le condizioni sono di *Sun Exposed* e *Wind Exposed*, per il solaio *Ground* e per le pareti interne *No Sun* e *No Wind*.

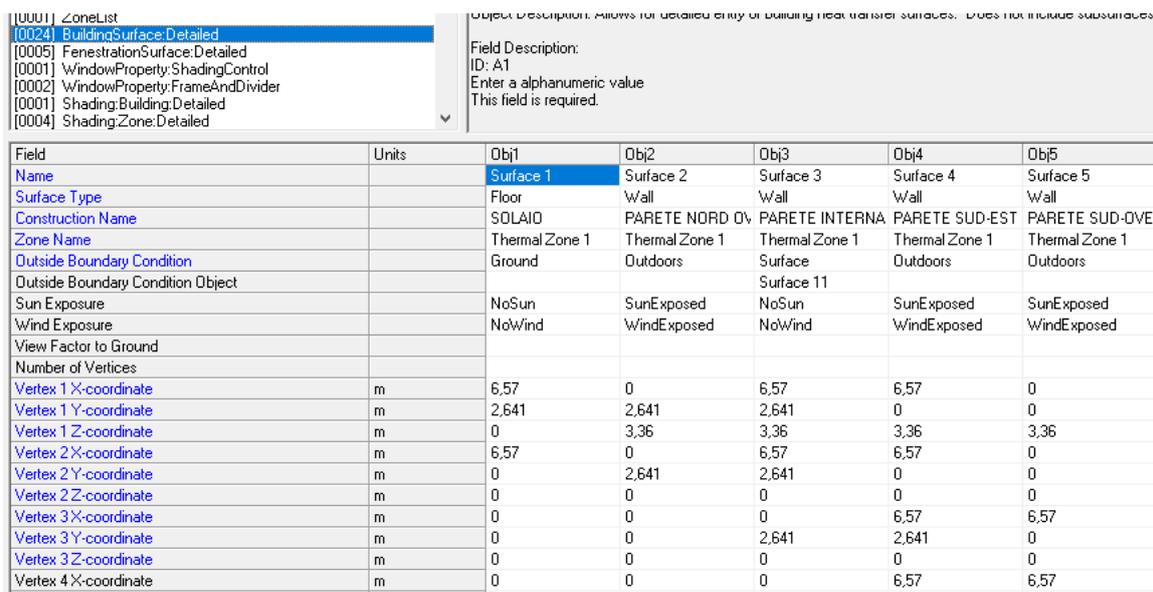


Figura 4.9: Interfaccia per l'assegnazione delle stratigrafie

4.3.3.2 Ipotesi sugli apporti interni

Gli apporti interni si dividono in tre voci su Energy Plus: *People*, *Lights* e *Electric Equipment*. Per quanto concerne la prima voce si è discusso in precedenza del profilo occupazionale, mentre ora si fa riferimento alle altre informazioni necessarie per la simulazione: il numero di persone, il metodo di calcolo, la quantità di calore emessa, la frazione radiante e la quota di calore sensibile. Il numero di persone è stato scelto pari a 10 per le due aule studio e a 3 per la sala controllo; da questo valore è possibile scegliere alla voce *Number of People Calculation Method* il metodo di calcolo che il software userà: nel nostro caso è stato scelto *people* in quanto è noto il numero di persone che occuperà i locali. Altre scelte sono *People per Area*, usato quanto si conoscono le persone al metro quadro per ogni locale, e *Area per person*. La frazione radiante è un numero compreso tra 0 ed 1 ed è utilizzato per caratterizzare il tipo di calore emesso dalle persone in una zona; il numero specificato in questo campo sarà moltiplicato per l'energia sensibile totale emessa dalle persone per dare la quota di radiazione a onda lunga guadagnata da parte degli occupanti. Il valore scelto è pari a 0,3 che è anche il valore di default del software. La voce successiva, *Activity Level Schedule Name*, è una schedule che indica il tipo di attività e il relativo calore emesso. E' possibile scegliere tra le opzioni di default oppure si può impostare una schedule personalizzata per gestire i valori. In questo caso studio si è impostata un'attività di ufficio con un'emissione di 126 W/persona corrispondenti ad un'attività di studio e scrittura. Questo valore è stato preso dalla sezione *Input/Output reference* fornito da Energy Plus:

Activity	Activity w/Person gyPlus Value	Level Ener- Schedule	Activity W/m2	Level met*
Seated, quiet	108		60	1
Standing, relaxed <i>Walking (on level surface)</i>	126		70	1.2
3.2 km/h (0.9 m/s)	207		115	2
4.3 km/h (1.2 m/s)	270		150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s) <i>Office Activities</i>	396		220	3.8
Reading, seated	99		55	1
Writing	108		60	1
Typing	117		65	1.1
Filing, seated	126		70	1.2
Filing, standing	144		80	1.4
Walking about	180		100	1.7
Lifting/packing	216		120	2.1

Figura 4.10: Valori di calore emessi per un ufficio

La quota di calore sensibile, corrispondente alla riga *Sensible Heat Fraction*, si lascia calcolare al software, lasciando come valore *Autocalculate*.

La seconda quota di apporti interni è rappresentata dalle luci. In mancanza di una simulazione appropriata che metta in relazione l'illuminazione interna ed esterna, si è ipotizzato il seguente sistema di illuminazione:

- per le aule studio e la sala controllo si è pensato di avere dieci fari a LED per ogni postazione , rispettivamente 10 per ogni aula e 3 , con l'aggiunta di due plafoniere per l'illuminazione generale. I dati riguardo i fari a LED sono stati presi dal catalogo luci della PHILIPS lighting [20] che fornisce per ogni prodotto la relativa scheda tecnica:

Una soluzione LED efficiente e affidabile

Ledinaire Downlight, apparecchio a risparmio energetico per una illuminazione diffusa e accogliente.

<p>Tipologia DN060B versione a incasso Modulo LED non sostituibile</p>	<p>Temperatura operativa Da 0°C a 35°C</p>
<p>Flusso luminoso LED8S: 800 lm LED18S: 1800 lm</p>	<p>Durata di vita Durata di vita (L70B50): 30.000 ore</p>
<p>Potenza LED8S: 9W LED18S: 18W</p>	<p>Connessione Connettore due fasi a viti (Classe I)</p>
<p>Efficienza 85 lm/W</p>	<p>Driver Integrato, non-dimmerabile</p>
<p>Temperatura di colore 3000K (bianco caldo) 4000K (bianco neutro)</p>	<p>Foro di incasso LED8S, ø 150+155mm LED18S, ø 201+205mm</p>

Figura 4.11: Scheda tecnica dei fari a LED per illuminazione di interni

Si è deciso di inserire 10 di questi fari nelle aule studio e 3 nella sala controllo. Siccome essi hanno la funzione di illuminare il singolo piano di lavoro degli studenti, si è pensato di associarvi come schedule quella dell'occupazione, in modo da avere un risparmio quando gli studenti sono assenti. Inoltre per evitare che tutta la potenza elettrica assorbita dai LED venga dissipata in calore, si sono inseriti i valori relativi alla frazione di calore emesso sotto forma di radiazione ad onda lunga, onda corta e il calore convettivo. Energy Plus per ogni luce compie il seguente bilancio:

$$f_{convected} = 1.0 - (ReturnAirFraction + FractionRadiant + FractionVisible) \quad (4.1)$$

I valori di queste frazione di calore emesso sono riportate nella sezione riguardante le luci del manuale *Input Output Reference*. Per i fari a Led si è scelta la categoria " Downlights, Compact Fluorescent, TRT" , avente come valori: Return Air Fraction=0,78 , Fraction Radiant = 0,09 , Fraction Visible = 0,13.

- per l'illuminazione generale si è pensato si mettere due plafoniere nelle aule studio , una per lato, e una nella sala controllo, sempre tratte dal catalogo della PHILIPS lighting:

<p>Tipologie SM461V</p> <p>Corpo e colori disponibili Corpo: alluminio rivestito e plastica Bordo: acciaio rivestito a polvere Ottiche: plastica</p> <p>Diffusore Plastica</p> <p>Sorgente luminosa Luce bianca: 3000K o 4000K Indice di resa cromatica nominale 80</p> <p>Potenza Versione quadrata (W57L57), 4000K • LED40S: 28,5 W • LED34S: 24 W • LED28S: 22 W Versione rettangolare (W17L169), 4000K • LED40S: 32,5 W • LED34S: 27 W • LED28S: 23 W</p>	<p>Temperatura operativa Da +10°C a +40°C</p> <p>Opzioni Illuminazione di emergenza (integrata): 1 ora (EL1) o 3 ore (EL3) Sistemi di controllo: Actilume (ACL)</p> <p>Vita sistema</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vita utile media L70B50: 70.000 ore a 45°C • Vita utile media L80B50: 50.000 ore a 45°C • Vita utile media L90B50: 25.000 ore a 45°C <p>Installazione Versione quadrata: individuale; fissaggio dell'apparecchio su piastra a soffitto pre-montata (fornita con l'apparecchio) Versione rettangolare: individuale o in fila continua; fissaggio dell'apparecchio alle staffe a soffitto pre-avvitate Possibilità di collegamento elettrico continuo.</p>	<p>Accessori Set di sospensioni dedicate per versione quadrata e rettangolare</p> <p>Configuratore SM460I</p>
--	--	---

Figura 4.12: Scheda tecnica delle plafoniere per illuminazione di interni

Si è optato per la la versione rettangolare a 23 W. Come schedule si è pensato di considerare l'illuminazione generale funzionante dalle 08:30 alle 19:00, pertanto si è creata una schedule dedicata. Inoltre anche per questo caso si sono specificate le quote di calore emesse, optando per la classe "Pendant, Indirect, T5HO" : Return Air Fraction = 0,0 , Fraction Radiant = 0,32 , Fraction Visible = 0,25.

L'ultima voce riguarda le apparecchiature elettroniche: *Electric Equipment* . Come apparecchiature si sono considerati:

- si è ritenuto che ogni studente abbia un computer portatile, pertanto si è associata la schedule dell'occupazione e come metodo di calcolo (*Design Level Calculation Method*) si è optato per Watt/pers. In questo modo si simula che ogni computer dissipi in media 90W;
- ogni aula studio è dotata di un proiettore; siccome il reale profilo di funzionamento non è disponibile, si è considerato come operante per tutta la durata di occupazione (08:30-19:00) ma la potenza è stata scalata per un funzionamento di 4 ore. In pratica si è presa la potenza di picco del proiettore, 190 W, lo si è considerato come operante in continuo per 4 ore e potenza è stata poi divisa per le 11 ore totali. La voce scelta in questo caso è *Equipment Level* poiché si conosce la potenza dell'apparecchio;
- il locale tecnico ha al suo interno un 3 inverter che dissipano calore. Per il calcolo della potenza dissipata si è considerato che l'inverter dissipi lo 0,03% della potenza complessiva del fotovoltaico. Si è calcolata la produzione di energia annua del fotovoltaico in kWh/anno, la si è moltiplicata per 0,03 e la si è scalata per le ore effettive di funzionamento del fotovoltaico per avere un'idea della potenza dissipata. Inoltre si è associata una schedule apposita per l'inverter: si sono considerate solo le ore di produzione di energia del fotovoltaico, attraverso la funzione SE di excel si è ricavato un file in colonna di 8760 valori dove il numero 1 indica produzione di energia, 0 l'inverso. Il file è stato convertito in file testo e passato ad Energy Plus attraverso la voce *Schedule File* che permette di caricare un file esterno. L'analisi è semplicistica in quanto si è considerato come se il fotovoltaico lavorasse sempre alle condizioni di picco. Anche in questo caso come metodo di calcolo si è scelto *Equipment Level* e si è inserito il valore di 71W.

Anche per le apparecchiature elettroniche è necessario inserire la quota di calore che viene realmente emessa dall'apparecchio che è diversa dall'energia elettrica assorbita. Per le attrezzature il bilancio è leggermente diverso rispetto alle luci in quanto non si calcola la frazione di calore emessa nel visibile (a bassa lunghezza d'onda), ma la frazione di calore emessa sotto forma di calore latente e quella persa (*lost*) che non viene conteggiata nel bilancio energetico:

$$f_{convected} = 1.0 - (FractionLatent + FractionRadiant + FractionLost) \quad (4.2)$$

In questa simulazione si è ipotizzato 0,5 come quota latente e 0,5 come quota convettiva.

4.3.3.3 Ventilazione

Non essendo ancora stato definito in sede progettuale un sistema di ventilazione meccanica, in questo caso studio si considera la ventilazione come naturale. Per ottenere i consumi elettrici associati alla ventilazione meccanica si associa un valore in kWh per volume di aria ricambiata. In Energy Plus si è scelta la voce *Zone Ventilation Design Flow Rate* per simulare la ventilazione di tipo naturale. Per la Sala Controllo e le due Sale Studio si è impostato come metodo di calcolo *Flow/zone* che consente di inserire i $m^3/(s \text{ persona})$. Il valore della portata è stato scelto in riferimento alla norma UNI 10339 che per zone adibite ad ufficio prescrive una portata volumetrica di 10 l/(s persona) , ovvero $0,01 m^3/(s \text{ persona})$:

Categorie di edifici	Portata di aria esterna o di estrazione		Note
	Q_{op}	Q_{os}	
	($10^{-3} m^3/s$ per persona)	($10^{-3} m^3/s$ per persona)	
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI			
RESIDENZE A CARATTERE CONTINUATIVO			
Abitazioni civili:			
- soggiorni, camere da letto	11	-	-
- cucina, bagni, servizi		estrazioni	Nei servizi 4 vol/h
-omissis-			
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI			
uffici singoli	11	-	-
uffici open space	11	-	-
locali riunione	10	-	-
centri elaborazione dati	7	-	-
servizi		estrazioni	Nei servizi 8 vol/h
-omissis-			

Figura 4.13: Valori della ventilazione secondo la UNI 10339

Per il Locale Tecnico si è fatto un ragionamento differente: siccome non è occupato da persone, non è possibile impostare il metodo di calcolo flow/person, allora si è optato per *flow/zone* che consente di inserire la portata volumetrica immessa nella zona in m^3/s . Il valore tipico per un ufficio di queste dimensioni è 0,3 vol/h ovvero ogni ora viene ricambiato lo 0,3 del volume totale. Da questo valore si è calcolata la portata volumetrica, moltiplicando i ricambi ora per il volume della stanza e dividendo per 3600 per avere i secondi:

$$Q = n \cdot \frac{V_{stanza}}{3600} \quad (4.3)$$

dove n rappresenta il valore del ricambio d'aria. Considerando l'altezza della zona pari a 3 metri e l'area pari a $15,76 m^2$, si ottiene un volume di $72,28 m^3$ e una portata Q di $0,00394 m^3/s$.

4.3.3.4 Infiltrazione

Per tenere conto delle infiltrazioni dell'aria esterna dovute alla non perfetta chiusura stagna degli infissi e dalle infiltrazioni dovuto all'apertura di porte e finestre, si è implementata la voce *Zone Infiltration Design Flow Rate*. Su Energy Plus si crea un oggetto per ogni zona termica in cui si specifica: il nome dell'oggetto, la zona termica di riferimento, la schedule per il periodo di funzionamento e il metodo di calcolo. Per quest'ultimo punto si è scelto di usare *Air Changer per hour 1/h*: significa che ogni ora si ha un ricambio di aria pari al % (da specificare) del volume totale di aria. I volumi tipici per un ufficio sono compresi tra 0,1 e 0,2, per questa simulazione si è optato per il valore di 0,15 1/h.

L'infiltrazione ha un effetto non trascurabile sul bilancio energetico dell'edificio. Durante il periodo di riscaldamento, le infiltrazioni contribuiscono ad aumentare il carico di riscaldamento in quanto si ha l'ingresso di aria a temperatura inferiore rispetto alla temperatura di set-point interno. Nella stagione estiva le infiltrazioni invece tendono nelle ore mattutine e serali a ridurre il carico per raffrescamento poiché l'aria, in quelle ore, è a

temperatura inferiore al set-point di 26°C. Tuttavia durante le ore centrali della giornata la temperatura dell'aria esterna può superare i 30°C e causare un maggior dispendio di energia per raffrescamento.

Object Description: Infiltration is specified as a design level which is modified by a Schedule
 $Infiltration = I_{design} * FSchedule * (A + B * (T_{zone} - T_{odb})) + C * WindSpd + D * WindSpd^{**2}$
 If you use a ZoneList in the Zone or ZoneList name field then this definition applies to all the zones in the ZoneList.

Field Description:
 ID: A2

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Infiltrazione SC	Infiltrazione SS1	Infiltrazione SS2	Infiltrazione LT
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 4
Schedule Name		INFILTRAZIONE	INFILTRAZIONE	INFILTRAZIONE	INFILTRAZIONE
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s				
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2				
Air Changes per Hour	1/hr	,15	,15	,15	,15
Constant Term Coefficient		1	1	1	1
Temperature Term Coefficient					
Velocity Term Coefficient					
Velocity Squared Term Coefficient					

Figura 4.14: Interfaccia di Energy Plus per la definizione delle infiltrazioni

4.3.4 Definizione del controllo termostatico e del sistema HVAC

Il controllo della temperatura nei quattro locali avviene attraverso la definizione dei termostati e del sistema HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*). Essendo ancora in una fase di simulazione, non si conoscono i componenti dell'impianto né le loro dimensioni, pertanto si è creato un sistema HVAC ideale che permettesse di avere una stima dei carichi di riscaldamento e raffrescamento. Per fare ciò si è utilizzato lo strumento *Zone HVAC: Ideal Load Air System*.

Per ognuna delle zone termiche sono stati creati due termostati: uno che si occupasse del riscaldamento durante la stagione invernale e uno per il raffrescamento nella stagione estiva. L'oggetto che si è usato per la creazione dei termostati è *Thermostat Setpoint: Single Heating* per l'inverno e *Thermostat Setpoint: Single Cooling* per l'estate. Ad essi va associata una schedule che specifichi i periodi di funzionamento e le temperature di set-point:

- per il termostato cosiddetto "invernale" si è deciso di impostare 13 °C quando l'edificio non è utilizzato, quindi durante le vacanze invernali, i weekend e le ore nelle quali il modulo è vuoto e si è impostato il valore di 20 °C durante gli orari di occupazione. Queste considerazioni valgono per la Sala Controllo e le due Sale Studio, per il locale Tecnico si è pensato di mantenere 15 °C durante gli orari feriali. Infatti il Locale Tecnico è solo sede di inverter e batterie, non vi sono persone, pertanto non è necessario imporre il valore di 20 ± imposto dal DPR 412/93;
- per il termostato cosiddetto "estivo" si è considerata come stagione di raffrescamento dal 01/04, poiché si è notato nelle simulazioni che la temperatura all'interno delle zone ad aprile supera in alcuni casi i 26 °C. Quando l'edificio non è operativo, il set-point è di 30 °C. Una menzione particolare riguarda il mese di agosto: inizialmente

si era pensato di non raffrescare, ma la temperatura superava in alcune giornate i 40 °C. Questa temperatura così alta porterebbe al danneggiamento dell'attrezzatura elettrica, allora per tutto agosto si è scelto come setpoint 35°C.

I termostati così definiti, si raggruppano alla voce *Zone Control Thermostat* che richiede i termostati per riscaldamento e raffrescamento e il nome della zona termica a cui sono associati. In aggiunta a questi, bisogna associare la schedule che controlla il sistema HVAC.

Per regolare il sistema HVAC è necessaria una scedule apposita che si può reperire all'interno del file *Expand Object Input Data File*. Questo è la versione espansa del file di input .IDF che si genera ogniqualvolta si svolge una simulazione. Da esso si è ricavata la schedule nominata *HVAC Template* che accetta valori da 0 a 4 che corrispondono ad altrettante configurazioni del sistema:

- 0: il sistema non è climatizzato;
- 1: il sistema è solo riscaldato e ad esso si associa il termostato *Thermostat Setpoint: Single Heating*;
- 2: il sistema è solo raffrescato e ad esso si associa il termostato *Thermostat Setpoint: Single Cooling*;
- 3: sistema con termostato avente stesso valore di setpoint per riscaldamento e raffrescamento; ad esso si associa il termostato *Thermostat Setpoint: Heating or Cooling*;
- 4: sistema detto a "banda morta", ovvero riscaldamento e raffrescamento hanno setpoint differenti e ad esso si associa il termostato *Thermostat Setpoint: Dual Setpoint*.

Dal gennaio fino al 31 marzo si è scelto il valore 1 di solo riscaldamento; da aprile al 15 ottobre si è optato per 2, solo raffrescamento, e dal 15 ottobre al 31 di dicembre si è reimpostato 1. In questo modo si evita un comportamento spurio del termostato e quindi un raffrescamento in inverno e viceversa in estate. Questa condizione potrebbe accadere nel caso si impostasse 4 come valore nella schedule e nel caso il controllo termostatico presentasse delle lacune.

4.3.5 Calcoli di progetto invernale ed estivo

Per carico termico invernale si intende la massima potenza termica che l'impianto di riscaldamento deve fornire per mantenere la temperatura di set-point all'interno della zona termica. Il calcolo si effettua nelle condizioni più gravose, ovvero il giorno più freddo dell'anno con una temperatura esterna costante e pari al valore minimo che può assumere per la zona in esame. La simulazione avviene quindi in regime stazionario. La normativa di riferimento per il calcolo di progetto invernale è la UNI 7357/74: il calcolo deve essere eseguito considerando nulli gli apporti interni e nulla la radiazione solare. Le principali perdite sono dovute alla trasmissione di calore verso l'esterno per conduzione attraverso l'involucro e alla ventilazione. La temperatura di progetto interna, o di set-point, è definita come la temperatura di bulbo secco dell'aria all'interno del locale e i suoi valori sono fissati dal DPR 412/93: per un locale abitato il valore è di 20 ± 2 °C, per le industrie 18 °C. Le temperature esterne di progetto sono tabellate per le località italiane nelle norma UNI

5364 e sono state determinate a seguito del monitoraggio temporale delle temperature con metodi statistici.

Torino	-8	Reggio Emilia	-5
Alessandria	-8	Ancona	-2
Asti	-8	Ascoli Piceno	-2
Cuneo	-10	Macerata	-2
Alta valle cuneese	-15	Pesaro	-2
Novara	-5	Firenze	0
Vercelli	-7	Arezzo	0

Figura 4.15: Valori della temperatura di progetto esterna per alcune località

All'interno del software Energy Plus per definire il giorno di progetto, si ricorre alla voce *Sizing Period: Design Day* che permette di specificare la data e le condizioni climatiche: alla riga *Day Type* è possibile inserire direttamente *Winter Design Day*. In seguito è stato necessario specificare il giorno dell'anno, l'umidità relativa e la velocità e direzione del vento. Il giorno scelto è il 15 di gennaio per cui la UNI 10349 prescrive una velocità del vento di 0,8 m/s con direzione prevalente Nord-Est e l'umidità relativa è stata impostata a 80%, valore tipico dei mesi invernali. Inoltre è possibile impostare il cielo come completamente coperto, inserendo il valore 0 alla voce *Sky Clearness*. Infine le schedule sono state modificate per annullare gli apporti interni e il termostato è stato impostato su sono riscaldamento usando la funzione *Thermostat Single Value: heating*.

Il calcolo di progetto invernale si è svolto in regime dinamico con un'oscillazione della sollecitazione esterna di tipo sinusoidale come prescritto dalla norma UNI EN ISO 13786:2008. In questo caso bisogna dimensionare l'impianto di raffrescamento in modo che soddisfi i carichi di picco. Infatti gli apporti interni e gli apporti solari non si annullano, ma si massimizzano, considerando il modulo come sempre occupato al massimo della sua capienza e con tutte le apparecchiature accese. Il giorno considerato è il 15 luglio, per cui la temperatura massima è di 30,5 °C con un'escursione giornaliera di 11°C e umidità relativa del 50%. Tutti i dati appena citati, sono elencati nella norma UNI 10339:

Località (stazione meteorologica)	T_{bse} °C	ΔT_{ge} °C	UR_e %	X 10^{-3} kg/kg	H m s.l.m.	Lat. Nord	Long. Est Greenwich	Mese più caldo
ALESSANDRIA	30,5	11,0	50	13,7	95	44° 55'	08° 36'	luglio
ASTI	32,0	11,0	50	15,0	152	44° 54'	08° 11'	luglio-agosto
CUNEO	29,0	12,0	55	13,7	536	44° 24'	07° 35'	luglio
TORINO CASELLE	30,5	11,0	50	16,4	282	45° 11'	07° 39'	luglio
VERCELLI	32,0	11,0	55	16,4	135	45° 19'	08° 25'	luglio
AOSTA	29,0	13,0	50	12,6	538	45° 44'	06° 08'	luglio
CAPO MELE	29,0	6,0	55	13,7	221	43° 57'	08° 10'	luglio
GENOVA	30,0	6,0	60	16,0	3	44° 25'	08° 51'	luglio

Figura 4.16: Valori di progetto per il calcolo estivo secondo la UNI 10339

Su Energy Plus si è inserito *Summer Design Day* e si sono impostate le condizioni descritte sopra. A differenza del caso invernale, la *Sky Clearness* è stata setta ad 1 per avere un cielo sereno e considerare gli apporti solari. Le schedule sono state modificate per avere l'occupazione massima e come termostato si è scelto di usare *Thermostat Single Value: cooling* per imporre il solo raffrescamento.

L'ultima precisazione riguarda le temperature di set-point interne da garantire. La norma UNI EN 12831 prescrive una temperatura interna di 20°C per i locali utilizzati come sale studio per la stagione invernale e di 26°C per la situazione estiva. Questi valori sono stati impostati nelle schedules dei termostati, in modo che l'impianto mantenga sempre la temperatura desiderata

4.4 Caso Studio

Si riassumono le ipotesi della simulazione termoenergetica:

- Apertura delle due sale studio e della Sala Controllo dalle 08:30 alle 19:00. Chiusura durante i weekend e le festività: vacanze di natale dal 23/12 al 07/01, vacanze di pasqua dal 18/04 al 25/04 e vacanze estive dal 01/08 al 31/08;
- la capienza massima è di 10 persone per le due Sale Studio e di 3 persone per la Sala Controllo. Il profilo di occupazione delle Sale Studio prevede affollamento del 50% fino alle 10:00, del 100% fino alle 12:30, del 30% fino alle 14:00 e infine del 100% fino alle 19:00; per la Sala Controllo l'occupazione è del 100% dalle 08:30 alle 19:00.
- 10 postazioni PC che consumano 90 W. Il numero di dispositivi accesi dipende dal profilo di occupazione delle aule.
- un proiettore per ognuna delle aule studio da 190 W; si è supposto funzionante per 4 ore di seguito;
- illuminazione delle due aule studio composta da 10 faretto a LED la cui accensione dipende dal profilo di occupazione e da due plafoniere sempre accese; per la Sala Controllo si sono considerati 3 faretto a LED e una plafoniera. Le apparecchiature elettroniche sono descritte nella sezione 4.3.3.2;
- ventilazione naturale con portata di 10 l/s/persona;
- accensione e spegnimento dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento secondo quanto descritto nel paragrafo 4.3.4;
- controllo termostatico identico per i tre locali occupati da studenti: dal 01/01 al 07/01 si lasciano 13°C, dal 08/01 al 30/03 per i giorni settimanali e durante l'orario di apertura si è imposta la temperatura di 20°C, nelle ore di chiusura 13°C; dal 01/04 al 31/07 si sono impostati 30°C nelle ore di chiusura e nei weekend e 26°C per i giorni settimanali durante l'orario di apertura; dal 01/08 al 31/08 si è imposto come limite massimo sulla temperatura 35°C; dal 01/09 al 15/10 26°C per i giorni settimanali durante l'apertura e 30°C nei weekend e nelle ore di chiusura; dal 16/10 al 23/12 il setpoint interno è di 20°C e di 15°C quando il modulo è inutilizzato;

Stagione	Data	Giorni	Orario	Temperatura
Riscaldamento	24/12-07/01	Lun-Dom	00:00-24:00	13
Riscaldamento	07/01-31/03	Lun-Ven	00:00-08:00	13
			08:00-19:00	20
			19:00-24:00	13
		Sab-Dom	00:00-24:00	13
Raffrescamento	31/03-17/04	Lun-Ven	00:00-08:00	30
			08:00-19:00	26
			19:00-24:00	30
		Sab-Dom	00:00-24:00	30
	18/04-25/04	Lun-Dom	00:00-24:00	30
	26/04-31/07	Lun-Ven	00:00-08:00	30
			08:00-19:00	26
			19:00-24:00	30
		Sab-Dom	00:00-24:00	30
	01/08-31/08	Lun-Dom	00:00-24:00	35
01/09-15/10	Lun-Ven	00:00-08:00	30	
		08:00-19:00	26	
		19:00-24:00	30	
	Sab-Dom	00:00-24:00	30	
Riscaldamento	16/10-23/12	Lun-Ven	00:00-08:00	13
			08:00-19:00	20
			19:00-24:00	23
		Sab-Dom	00:00-24:00	13

Capitolo 5

Il generatore fotovoltaico

5.1 Caratteristiche climatiche del sito

La città di Torino è caratterizzata da un clima temperato di tipo subcontinentale con inverni freddi e umidi e estati calde e afose; le piogge si concentrano soprattutto nei mesi primaverili e invernali mentre in estate prevalgono temporali brevi ed improvvisi. Secondo l'articolo 9 del D.P.R. n. 412/93 Torino fa parte della fascia climatica E, ovvero la fascia compresa tra i 2101 e i 3000 Gradi Giorno, definiti come somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura esterna media giornaliera [21]; ne consegue che la stagione di riscaldamento inizia il 15 Ottobre e prosegue fino a 15 aprile. Di seguito si è valutata la temperatura media giornaliera tramite il software Energy Plus:

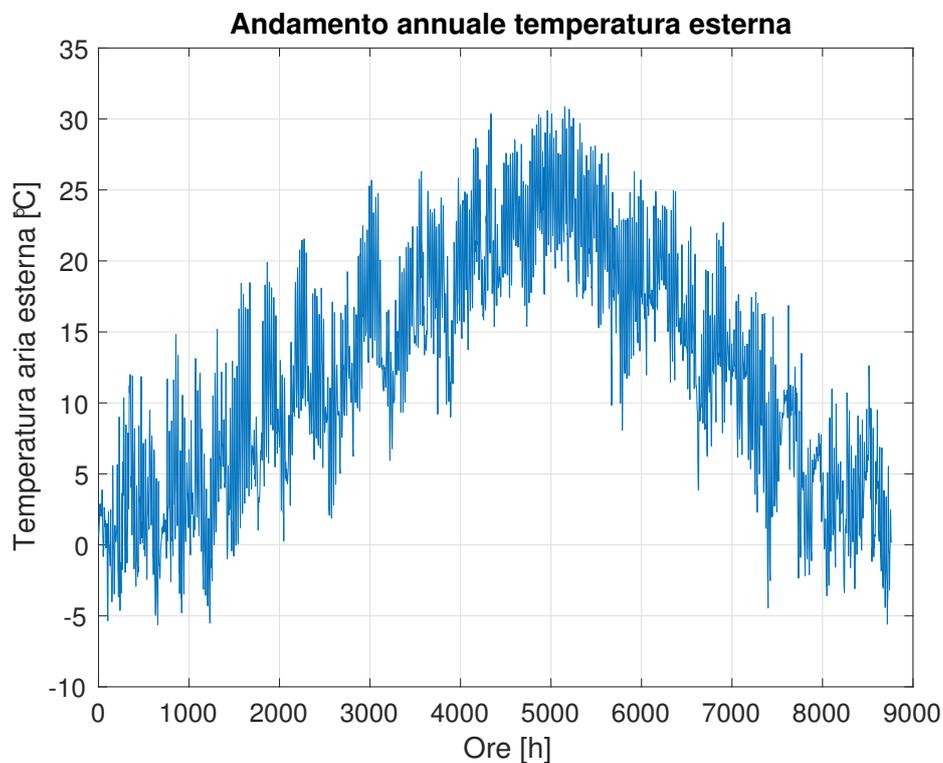


Figura 5.1: Temperatura media esterna Torino

Tramite il sito PVGIS si è ricavato l'andamento medio giornaliero dell'irradianza in W/m^2 per tutti i mesi dell'anno. I mesi peggiori sono dicembre e gennaio per cui sia il valore massimo è piuttosto basso, $237 W/m^2$ per il primo e $260 W/m^2$ per il secondo, sia le ore di disponibilità di luce solare sono limitate. Viceversa i mesi di Luglio e Giugno si dimostrano i migliori dal punto di vista della producibilità, con Luglio che offre il picco di irradianza di $765 W/m^2$ e Giugno che ha la durata di luce maggiore, dalle 04:37 alle 19:37.

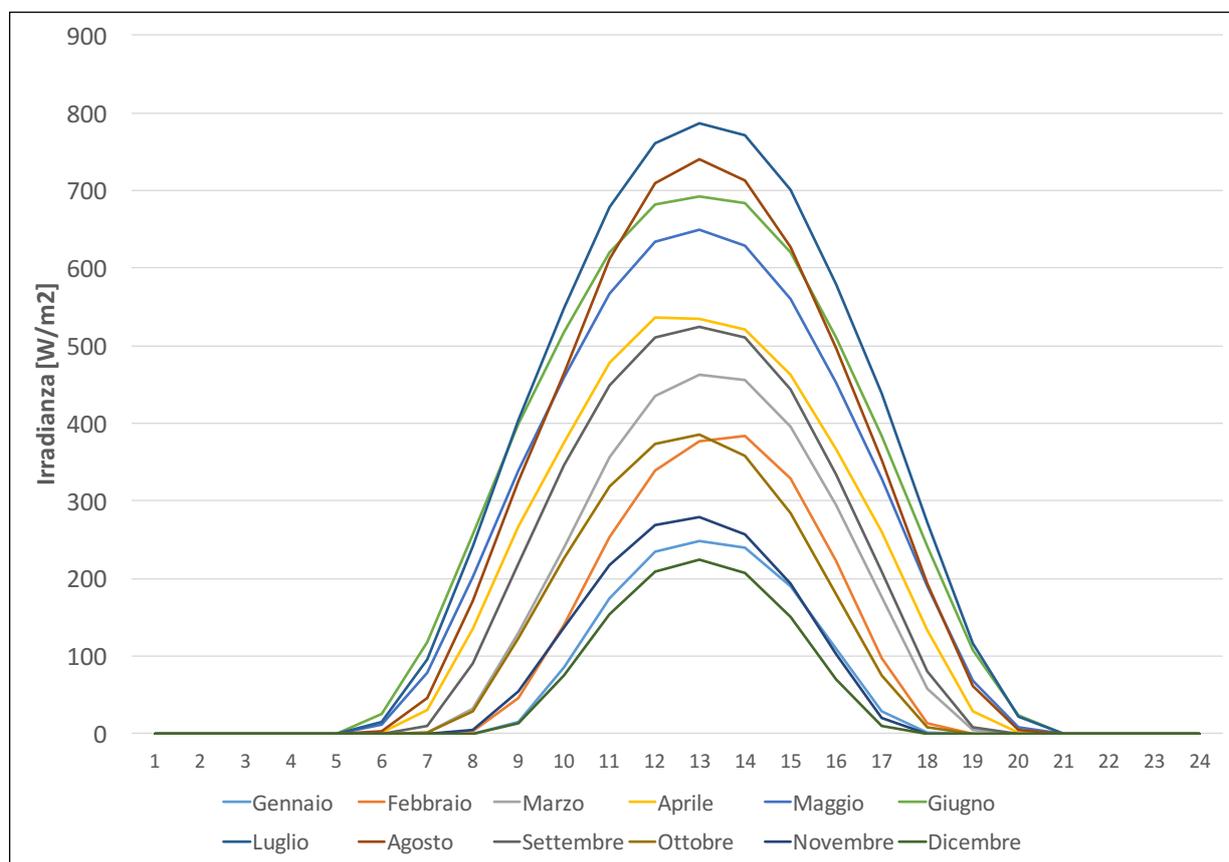


Figura 5.2: Valori medi giornalieri di irradianza

Per avere un'idea della durata delle ore giornaliere e degli angoli solari, in particolare dell'altezza solare α e dell'azimuth γ , è utile fare riferimento alla carta solare del sito. Le carte solari sono una rappresentazione 2D del percorso del sole sulla volta celeste. I grafici solari sono una rappresentazione 2D dei percorsi del sole sopra il cielo. Questi percorsi sono tracciati per diversi periodi dell'anno e sono la proiezione dell'orbita del sole sopra il piano orizzontale e consente di valutare la posizione del Sole per ogni ora del giorno e per ogni giorno dell'anno, per mezzo dell'angolo di altezza solare e dell'azimut solare, I grafici solari possono essere tracciati in grafici a coordinate polari o rettangolari e in questo caso si è scelta la rappresentazione polare: le circonferenze concentriche rappresentano punti aventi stessa altezza solare che spazia da 0° a 90° con un intervallo di 10° , i raggi rappresentano gli angoli azimuthali e le linee tratteggiate che seguono il percorso Est-Ovest rappresentano il percorso del sole durante 12 giorni particolari ovvero il 21 di ogni mese [22] (due linee per i due solstizi e 5 linee per i rimanenti 10 mesi).

Si può notare l'evidente differenza tra il solstizio d'estate e quello d'inverno: nel primo la durata del giorno è di 16 ore poiché il sole sorge alle 5:30 e tramonta alle 21:30 con un'altezza solare massima alla culminazione di circa 78° ; viceversa il 21 dicembre ha una

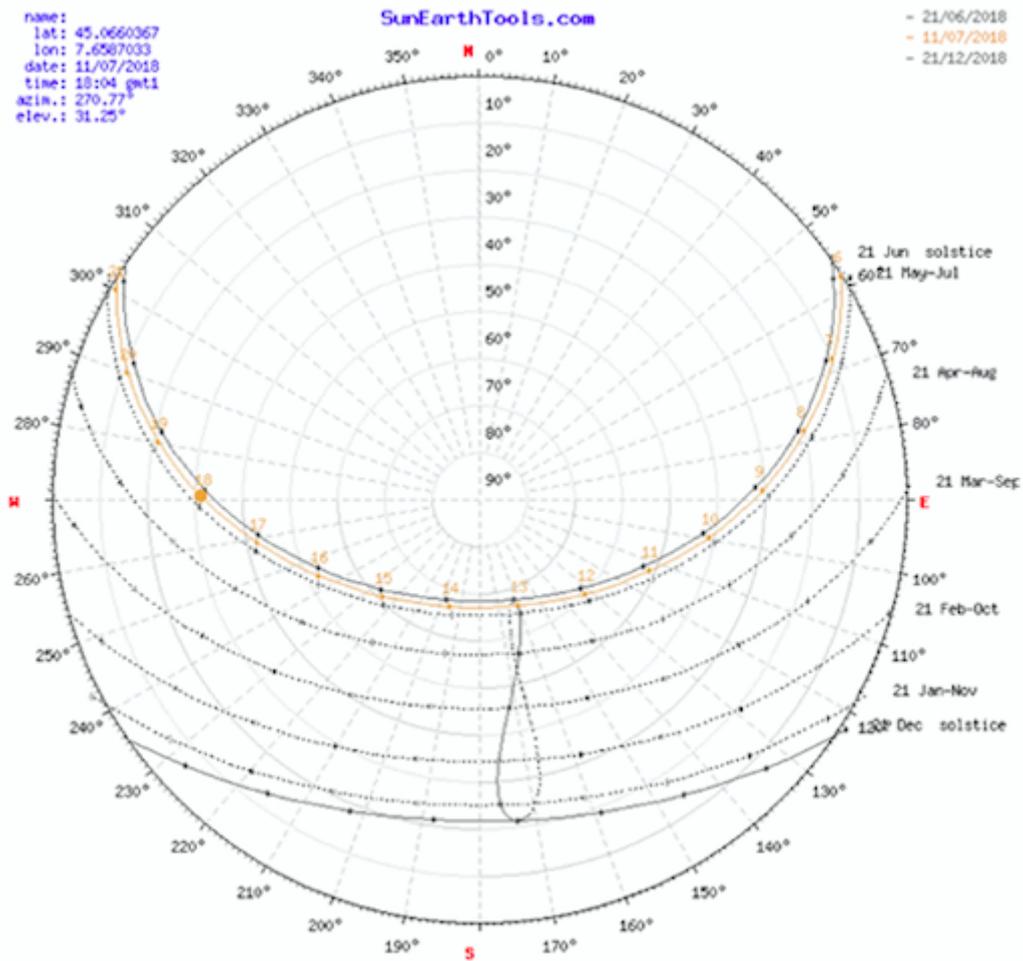


Figura 5.3: Carta solare per il sito studiato

durata di 10 ore, dalle 08:00 alle 16:00, e il sole si mantiene molto basso durante tutto l'arco della giornata, presentando un massimo di 22°.

5.2 Tecnologia moduli fotovoltaici

La produzione di energia elettrica per soddisfare i fabbisogni dell'edificio avviene tramite i pannelli fotovoltaici. Nella trattazione che segue si useranno i termini pannello e modulo per indicare lo stesso concetto. Per questo studio sono stati scelti i pannelli della SunPower, azienda leader nel settore del fotovoltaico, in particolare il modello X22-360. Il modulo è costituito da 96 celle monocristalline Maxisun di III generazione che sono all'avanguardia per la loro struttura a tre strati [23]:

- il primo strato è privo di reticolo cristallino che consente un assorbimento dei raggi solari ottimale e maggiore rispetto alle celle convenzionali;
- il secondo strato è costituito da silicio ultra puro per massimizzare la conversione dell'energia solare;
- l'ultimo strato è costituito da rame che conferisce solidità meccanica (compensando quindi l'assenza del reticolo metallico) e di proprietà anti corrosive, fondamentali per il sistema che è sempre sottoposto all'azione degli agenti atmosferici.

Le dimensioni del modulo sono 1,559x1,046 m e uno spessore di 46 mm. Siccome un singolo modulo genera una potenza di 360 W nominali, per raggiungere valori più elevati è necessario connettere più moduli insieme: si definisce stringa fotovoltaica la connessione elettrica di più moduli in serie. Una stringa del nostro caso studio è composta da sei moduli collegati in serie per una lunghezza totale di 6,276 m. Di seguito si riporta la scheda tecnica con i dati elettrici :

DATI ELETTRICI	
	SPR-X22-360
Potenza nominale (P _{nom}) ¹¹	360 W
Tolleranza di potenza	+5/-0%
Efficienza media del modulo ¹²	22,2%
Tensione al punto di massima potenza (V _{mpp})	59,1 V
Corrente al punto di massima potenza (I _{mpp})	6,09 A
Tensione a circuito aperto (V _{oc})	69,5 V
Corrente di cortocircuito (I _{sc})	6,48 A
Tensione massima del sistema	1000 V IEC & 600 V UL
Corrente massima del fusibile	15 A
Coeff. temp. potenza	-0,29% / °C
Coeff. temp. tensione	-167,4 mV / °C
Coeff. temp. corrente	2,9 mA / °C

Figura 5.4: Dati tecnici dal Datasheet fornito da SunPower

Si è utilizzato il software open source *System Advisor Model*, abbreviato in SAM, per selezionare il modello Sun Power X22-360 dal catalogo di moduli proposti per ottenere la curva caratteristica corrente - tensione che si presenta come segue:

5.3 Posizionamento pannelli

Le stringhe sono costituite da 6 moduli collegati in serie che forniscono una potenza nominale P_N di 2160 W. Vista la collocazione spaziale del modulo, per sfruttare al meglio l'apporto solare si è pensato alla seguente disposizione:

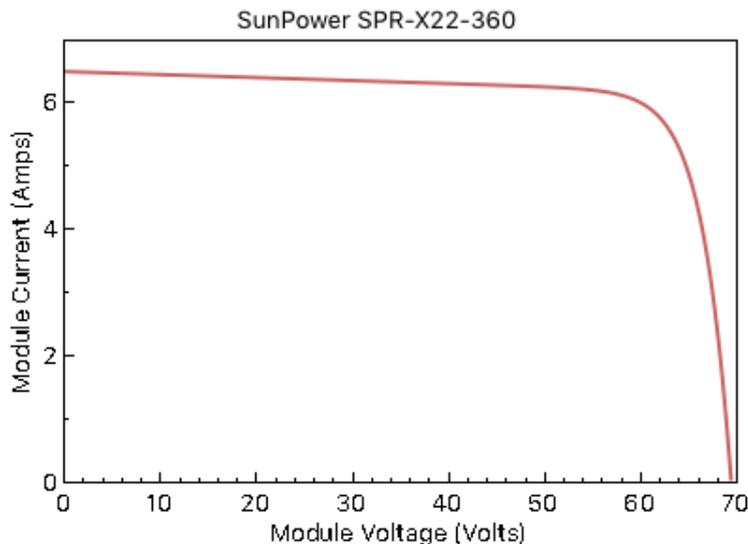


Figura 5.5: Caratteristica tensione corrente

- Una stringa posizionata con orientamento Sud-Ovest posta sopra la Sala Controllo. L'inclinazione è di 30° rispetto all'orizzontale per cercare di ottenere una produzione massima durante tutto l'anno. L'azimuth è di 26° quindi l'orientamento risulta essere più verso Sud che verso Ovest;
- una stringa posizionata sopra una delle due sale gemelle e con orientamento Sud - Est con inclinazione di 20° . La stringa è stata collocata quanto più possibile al centro della copertura per ritardare l'ombreggiamento dovuto alla facciata dell'edificio I3P ed è maggiormente esposta verso Est;
- una stringa è collocata sopra l'altra sala studio, con orientamento Nord - Ovest e inclinazione 20° . Si tratta della stringa più penalizzata all'orario mattutino poiché riceve la luce solare più tardi rispetto alle altre stringhe ed è più orientata verso Ovest che verso Nord;
- l'ultima stringa è collocata sopra la sala macchinari, con orientamento Nord - Est e inclinazione di 10° . Questa è la stringa che più soffre a causa dell'orientamento poiché ha meno ore solari rispetto alle altre, per questo motivo la si è inclinata quanto più possibile per favorire lo sfruttamento della risorsa solare durante i mesi estivi, a discapito di quelli invernali.

La posizione delle stringhe è stata pensata in modo da accoppiare la produzione di energia elettrica con i consumi dell'ambiente considerato. Da qui emerge la necessità di avere una schedule precisa degli orari di utilizzo dei vari ambienti in modo tale che le curve di produzione e di carico si sovrappongono. L'aula studio è l'ambiente che si utilizzerà per un numero maggiore di ore ed è necessaria la disposizione dei pannelli verso Sud - Est poiché si ottiene un'ottimizzazione del profilo giornaliero. Viceversa, siccome gli altri due ambienti sono penalizzati dal punto di vista dell'orientamento, è necessario prevedere un utilizzo in fasce orarie ristrette. Bisogna tenere presente che i moduli non solo alimentano la zona termica sottostante, ma hanno il compito di caricare le batterie al litio durante le fasi di surplus di energia.

Un altro punto cruciale è l'inclinazione dei pannelli. L'inclinazione è fondamentale per ottimizzare la produzione di energia, infatti un'inclinazione più elevata favorisce un

migliore rendimento durante la stagione invernale, viceversa per la stagione estiva. Questo è dovuto alla differente altezza del sole che al solstizio d'inverno per Torino è di circa 21° e dunque è necessaria un'inclinazione di circa 68° . Nel caso in esame si è scelta un'inclinazione di 20° e 30° analoga a quella di un tetto comune di un'abitazione e dunque durante il periodo invernale l'intervento delle batterie sarà cruciale poiché la produzione sarà penalizzata.

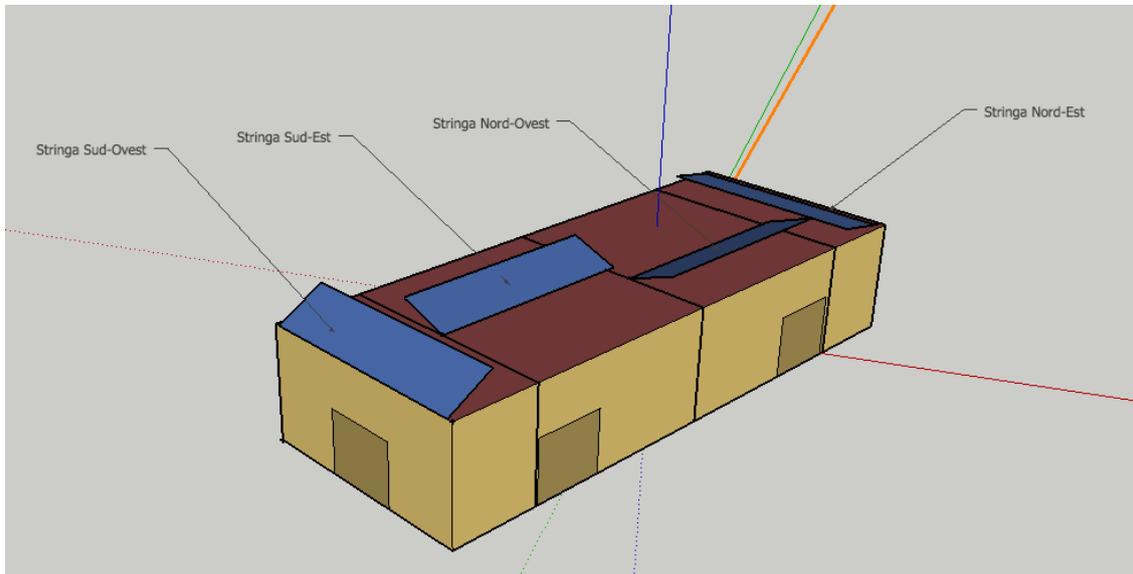


Figura 5.6: Modello del modulo abitativo e dei pannelli fotovoltaici

5.4 Ombreggiamento

Tramite il software SketchUp e il suo plug-in OpenStudio è possibile avere una rappresentazione delle ombre dovute agli edifici circostanti. La rappresentazione delle ombre è fondamentale per evitare il MISMATCHING delle curve caratteristiche $I(U)$, a causa sia dei difetti costruttivi sia appunto dell'ombreggiatura.

Si affrontano in questo paragrafo, in breve, le problematiche relative all'ombreggiatura parziale di un generatore fotovoltaico. Se N_S celle connesse in serie a formare una stringa e una di esse presenta una curva $I(U)$ diversa dalle altre, allora la caratteristica risultante è formata dalla somma, per una data corrente, della tensione $(N_S-1)U$ delle N_S-1 celle uguali con la tensione della cella ombrata [24]. La curva risultante può presentare una potenza decisamente diminuita nel caso di pesante ombreggiatura, ma in ogni caso la potenza risultante è sicuramente minore della somma delle singole potenze delle celle connesse tra loro. Tuttavia grazie all'utilizzo di un diodo connesso in antiparallelo alla cella in ombra è possibile evitare che la cella lavori come un utilizzatore con tensione inversa con il rischio di dover dissipare un'energia troppo elevata tale da portare alla rottura della cella. Inoltre il diodo evita che la potenza complessiva si riduca alla potenza della cella ombrata, ma fa sì che la potenza risultante sia decurtata solo del contributo della con caratteristica peggiore.

Nel caso in esame la presenza della parete dell'edificio I3P è la principale causa di ombreggiamento, a causa della sua notevole elevazione, nel caso invernale penalizza notevolmente

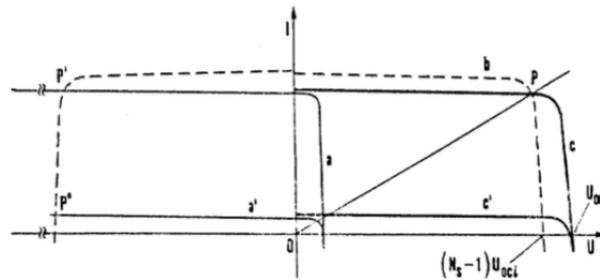


Figura 5.7: Rappresentazione delle caratteristiche per : b) Curva delle (N_S-1) celle buone a') curva cella ombrata c') caratteristica risultante in caso di shading

l'impianto fotovoltaico. Le misure della parte sono state ottenute dalla planimetria in formato DWG fornito dal dipartimento EDILOG del Politecnico di Torino. Per ottenere l'altezza della parete si è usato il comando *DIM* su AutoCad che permette di quotare gli elementi grafici e per l'angolazione del tetto si sono usati i comandi da line *DIM* e *Angular*. La parete esterna dell'edificio è alta 10 m e con il contributo del tetto si toccano i 13,55 m di altezza. Il tetto non è posizionato ad una distanza di 6 m dalla parete ed è inclinato di 27° .

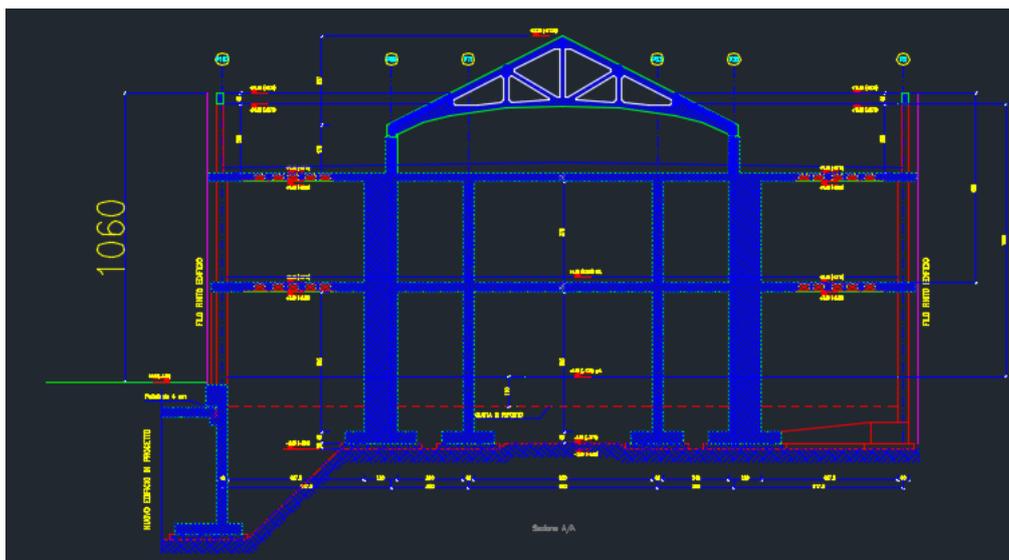


Figura 5.8: Formato DWG della sezione dell'edificio I3P

Grazie a questi dati è stato possibile riprodurre la geometria su SketchUp e simulare l'ombreggiamento. Per fare questo è necessario creare una superficie schermante tramite il comando *New Shading Surface Group*, si genera quindi una box nella quale, tramite doppio click, si può disegnare la superficie. In questo studio le superfici schermanti sono state create fuori dalle zone termiche, in alternativa è possibile disegnarle all'interno di esse. Una volta chiusa la superficie essa apparirà di colore viola, indicante che la superficie è considerata come schermante e l'ombra sarà proiettata proprio dalla facciata viola. E' possibile invertire l'orientamento della superficie tramite il comando *reverse face* così da proiettare l'ombra nel verso corretto. Un altro strumento utilizzato è stato l'*OpenStudio Inspector* che consente di identificare le caratteristiche della superficie, ovvero: nome, posizione tramite coordinate, condizione al contorno e nome dello spazio in cui essa è definita. Anche l'elemento aggettante del modulo e collocato sul tetto è stato realizzato

nello stesso modo e questo non ombreggia i pannelli ma è necessario per sapere la riduzione degli apporti solari gratuiti sull'edificio. Per visionare l'evoluzione delle ombre durante la giornata si seleziona il comando *Show Shadow Settings Dialogue* (icona a forma di calendario) che apre una tendina tramite la quale è possibile modificare mese, giorno e ora. Nel progetto su SketchUp non è stata riportata la parete dell'edificio I3P in tutta la sua lunghezza di 132,75 m, ma solo una parte di lunghezza 91,35 m: infatti si è osservato tramite SketchUp che è sufficiente rappresentare unicamente quella parte per avere un'idea dell'ombreggiamento e garantire allo stesso tempo una maggiore velocità di elaborazione al software Energy Plus. Di seguito nella figura è rappresentato il modello su SketchUp con l'apposita interfaccia per modificare il periodo da considerare:

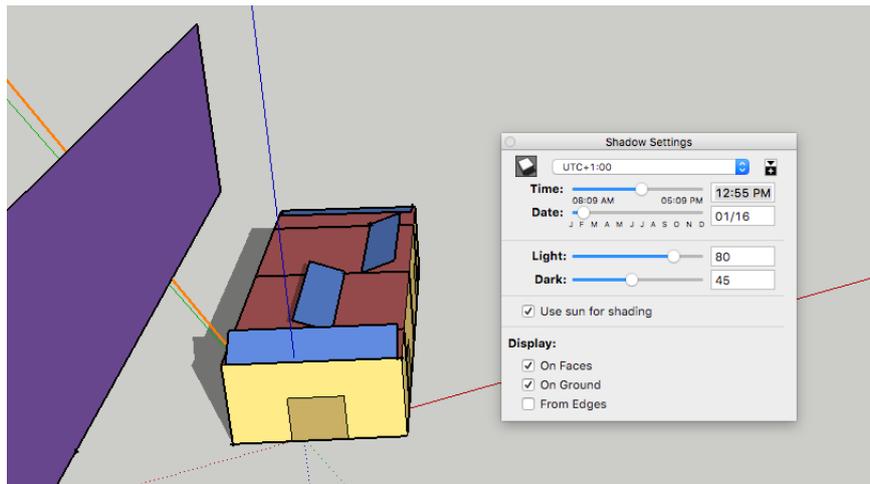


Figura 5.9: Modello delle superfici schermanti

Di seguito si riportano due esempi di simulazione dell'ombatura per un giorno invernale e uno estivo allo stesso orario in modo da mostrare la notevole differenza e come l'ombatura influisca sui moduli fotovoltaici.

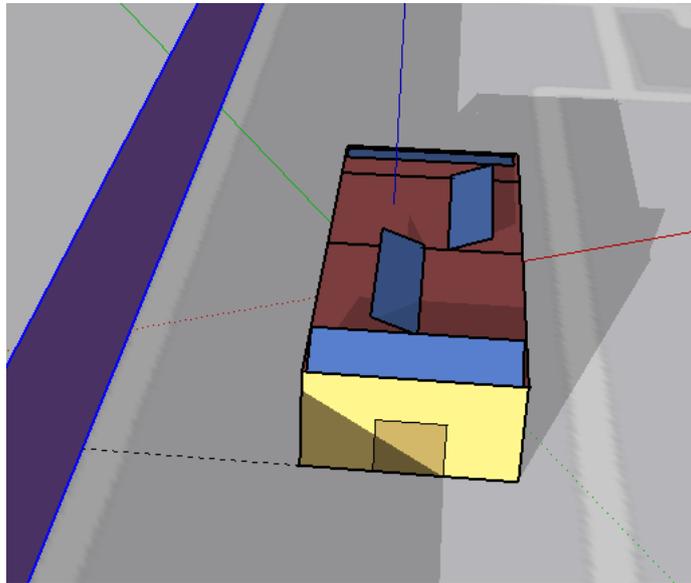


Figura 5.10: Ombratura 20 Gennaio alle ore 15:53

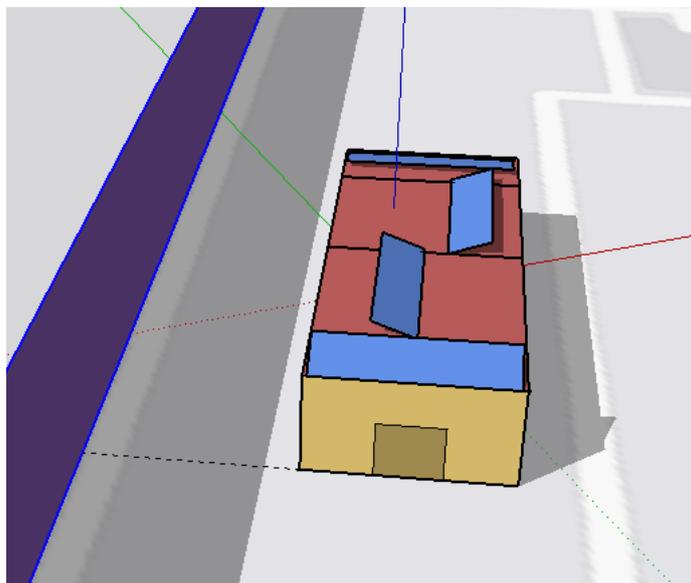


Figura 5.11: Ombratura 20 Luglio alle ore 15:53

Come ci si aspetta, la differenza nei due casi è notevole: in inverno nel pomeriggio il modulo abitativo è quasi completamente oscurato, in particolare le stringhe fotovoltaiche sopra la sala conferenze e l'aula tesisti sono completamente ombreggiate; viceversa in estate la situazione è più favorevole in quanto la stringa sopra l'aula tesisti è solo parzialmente oscurato così come quella sopra l'aula studio. Si potrebbe ovviare a questo problema cercando di spostare l'edificio quanto più possibile verso la ringhiera a filo del prato ma per legge va mantenuta una distanza di almeno 1,8 m e inoltre è necessario usufruire di spazio per permettere l'ingresso laterale alla sala conferenza.

Un'analisi più approfondita dell'effetto dell'ombreggiamento è stata condotta tramite il software Energy Plus. Da SketchUp è possibile importare un file in formato .IDF da editare direttamente con Energy Plus: il file contiene le informazioni riguardante la geometria del sistema, quindi dimensioni, orientamento e collocazione secondo le coordinate geografiche sia del modulo abitativo sia delle singole stringhe. Alla voce *Output Variable* si è scelta la voce *Surface Outside Sunlit Solar Fraction* che restituisce in output la frazione di radiazione che raggiunge tutte le superfici esterne. I valori sono orari, ma è possibile ottenere una simulazione più raffinata diminuendo il *Time Step* della simulazione. Per avere dei valori indicativi dal punto di vista energetico si è valutata l'irradianza globale che raggiunge i quattro pannelli: su Energy Plus si è scelta come *Output Variable* la voce *Surface Outside Incident Solar Radiation Rate per Area* che restituisce i valori in W/m^2 . Successivamente per ogni mese si è valutato il valore medio dell'irradianza ora per ora per ogni mese in modo da avere un andamento medio giornaliero da moltiplicare per la frazione di irraggiamento così da ottenere l'irradianza effettivamente agente sul pannello. Tramite Matlab si è impiegata la funzione *contourf* che genera le isolinee della matrice costituita dai valori dell'irradianza pesata: i risultati sono visualizzabili per ogni ora del giorno per ogni mese, considerando come intervallo orario la fascia 00:05:-19:00 per escludere le ore notturne che non hanno significato.

La stringa posizionata a Sud-Ovest raggiunge i valori maggiori di irradianza durante il periodo estivo, $800 W/m^2$, in particolare nel periodo da fine giugno ad inizio agosto nella fascia oraria 12:30-14:30. L'esposizione è la più favorevole tra tutte le stringhe poiché rispetto alle rimanenti presenta valori di irradianza più costanti durante tutti i mesi: in particolare si ottiene il valore costante di circa $500 W/m^2$ nelle fasce centrali della giornata da febbraio ad aprile, quindi per tre mesi, a differenza delle altre stringhe che presentano un intervallo orario più limitato. Si nota anche che l'esposizione verso Ovest sfavorisce la producibilità nelle ore mattutine a causa della bassa irradianza mentre è incentivata nelle ore serali rispetto alle altre stringhe.

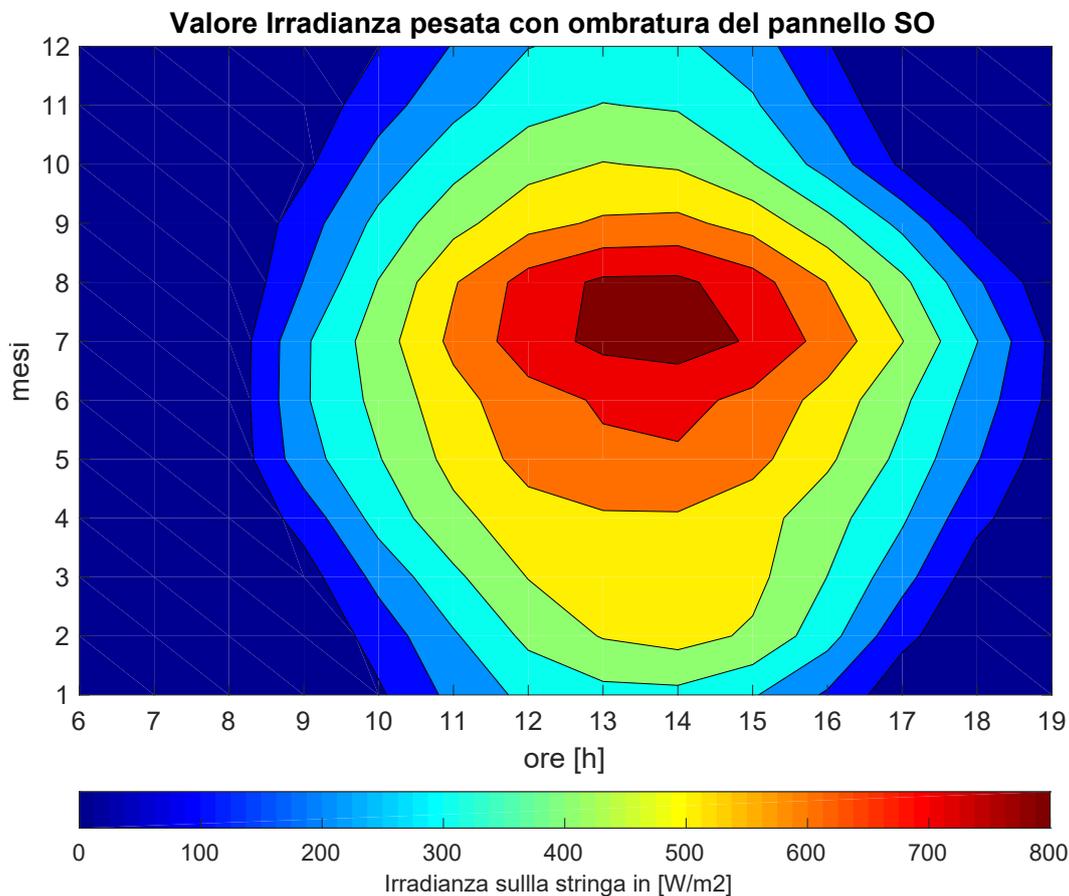


Figura 5.12: Irradianza sul modulo orientato a S-O

La stringa posizionata sopra l'aula studio adiacente alla sala controllo presenta un picco di 800 W/m^2 nei mesi estivi da fine giugno ad inizio agosto ma rispetto al primo caso la fascia orario è più ristretta. A differenza della prima stringa si ha globalmente una distribuzione più sfavorevole: questo si evince perché i valori sono i medesimi ma l'ampiezza delle aree rispetto all'asse dei mesi è inferiore, il che implica una minore irradianza media e dunque una minore producibilità. Si osserva questa differenza poiché la prima stringa è esposta maggiormente verso a Sud, essendo l'azimuth di 26° , mentre questa è diretta maggiormente ad Est. Ne consegue anche che la stringa riceve i raggi solari durante la mattinata, alle 07:00 nel mese di giugno contro le 08:45-08:50 di giugno

della prima stringa; al contrario nel pomeriggio l'irradianza è favorita nell'esposizione SO. Un altro dettaglio rilevante riguarda i bassi valori nei mesi di Novembre e Dicembre, a causa dell'ombra proiettata dalla prima stringa, il cui effetto non è trascurabile. Infine si nota che la distribuzione dei valori si presenta come più uniforme durante tutto l'anno.

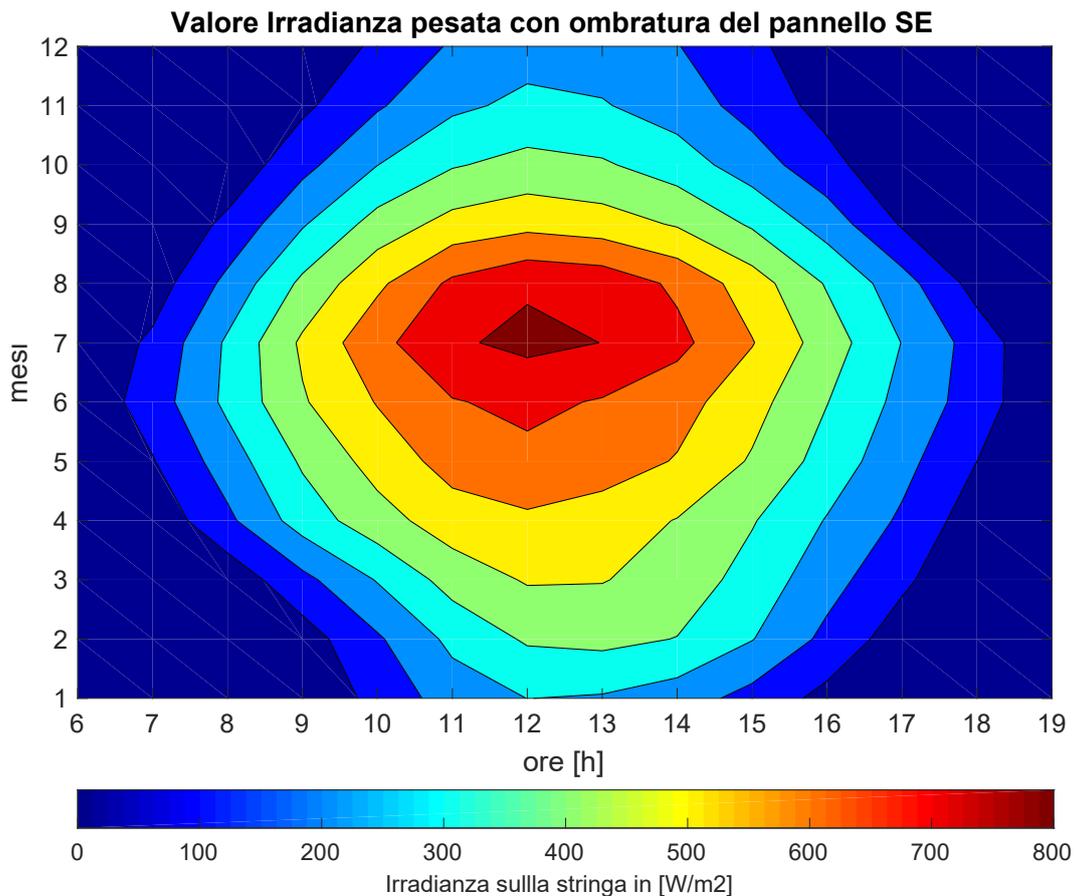


Figura 5.13: Irradianza sul modulo orientato a S-E

La terza stringa è collocata sopra l'altra aula studio e rispetto alle altre due stringhe è quella orientata meno favorevolmente, ovvero verso Nord - Ovest. Rispetto alle stringhe precedenti il valore massimo durante i mesi estivi è inferiore, assestandosi a circa 700 W/m^2 ; inoltre le aree con i colori verde, giallo e arancione (corrispondenti a valori da 400 W/m^2 - 600 W/m^2) sono più ristrette rispetto all'asse delle ordinate con i mesi, il che

indica valori annuali di irradianza nettamente inferiori ai casi precedenti. I mesi invernali da novembre a febbraio presentano i valori inferiori di irradianza durante tutto l'arco della giornata con valori di 200 W/m^2 per novembre e febbraio e di 100 W/m^2 per dicembre e gennaio. L'esposizione in parte verso Ovest favorisce la produzione nelle ore serali: nel mese di giugno l'irradianza raggiunge il pannello fino alle 18:30 circa come la prima stringa e nel mese di dicembre fino alle 16:00 a differenza della stringa orientata verso Sud-Est la cui produzione si arresta poco dopo le 15:00. I risultati grafici hanno confermato la teoria che prevede questa come l'esposizione peggiore.

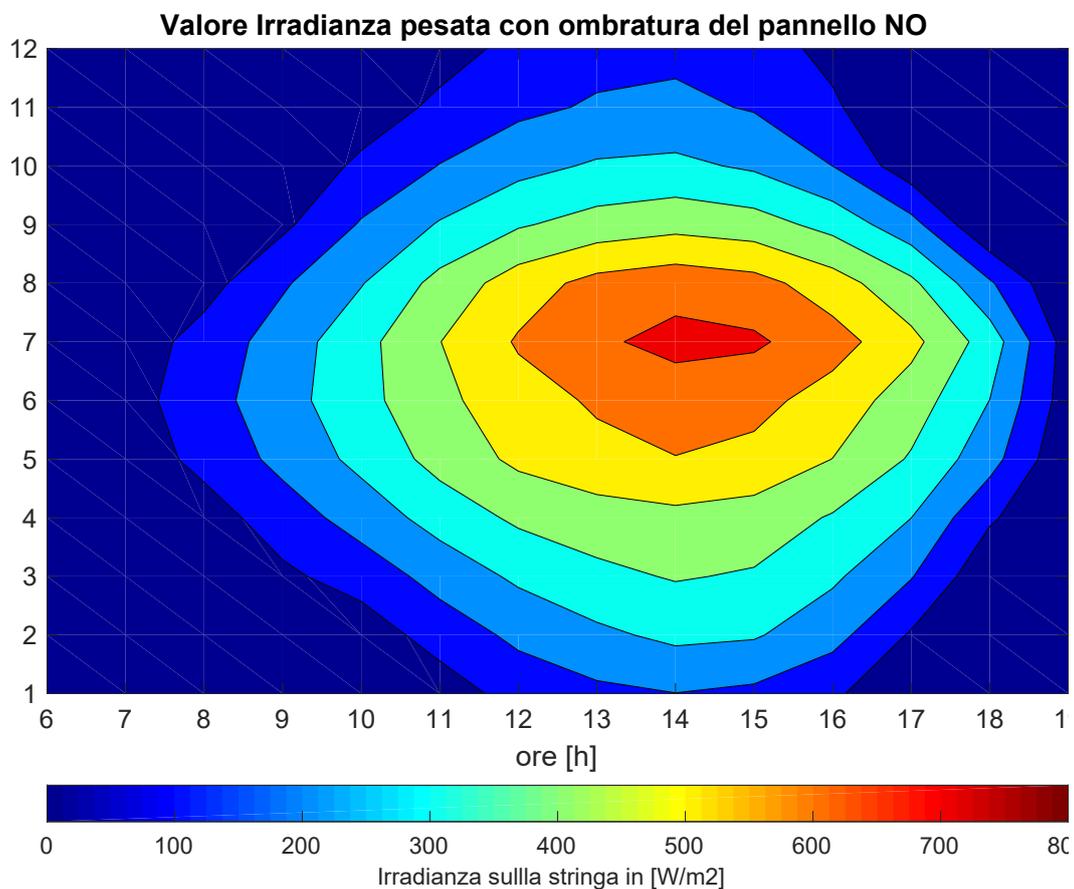


Figura 5.14: Irradianza sul modulo orientato a N-O

L'ultima stringa è posizionata sopra il locale tecnico ed ha l'orientamento Nord - Est.

Anche in questo caso l'esposizione a Nord rappresenta un punto a sfavore per quanto riguarda la producibilità: questa stringa ha un comportamento analogo alla precedente in quanto offre una maggiore irradianza nei mesi mattutini a discapito delle ore serali, dunque è quasi complementare alla stringa orientata NO. Anche in questo caso il picco nei mesi estivi è inferiore rispetto alle esposizioni verso Sud, inoltre nei mesi invernali i valori sono bassi in linea con le aspettative poiché l'azimuth di 26 gradi indica un orientamento prevalente verso Nord.

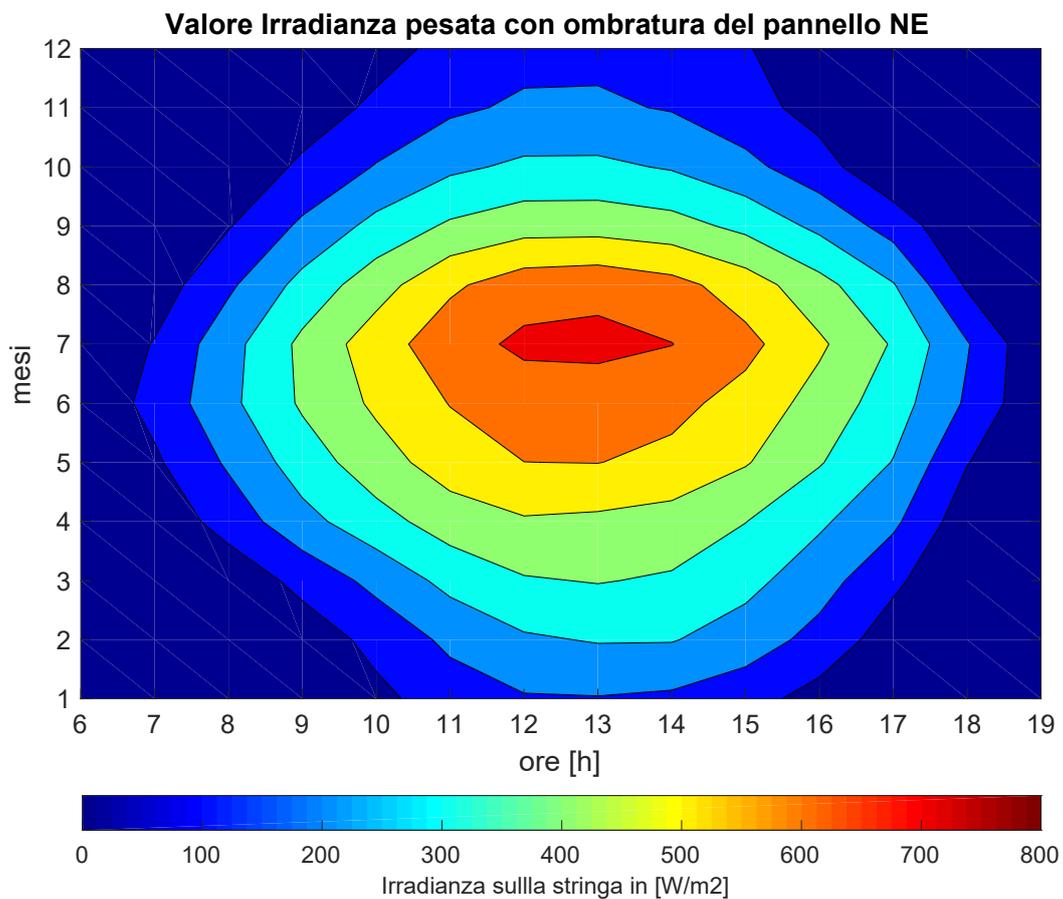


Figura 5.15: Irradianza sul modulo orientato a N-E

Per terminare l'analisi dell'ombreggiamento si riportano sia i dati sotto forma di tabella sia un grafico ad istogrammi che rappresentano la percentuale di energia persa dovuta alla

parete de I3P. Per svolgere questa analisi si sono lanciate due simulazioni con Energy Plus, una con la presenza dell'elemento ombreggiante, l'altra libera da ostacoli. Per ogni mese e per entrambi i casi studio si è calcolato il valore medio giornaliero della produzione di energia elettrica e li si sono confrontati calcolando la distanza tra i due valori nel seguente modo:

$$err = \frac{E - E_{Shaded}}{E} \quad (5.1)$$

dove E rappresenta l'Energia prodotta senza ostacoli ed E_{shaded} l'energia ridotta a causa dell'ombreggiatura.

Dal grafico risulta che la stringa che subisce la riduzione maggiore di energia è quella Nord-Ovest, tanto da arrivare ad una riduzione del 12% nel mese di dicembre. Dunque non solo l'orientamento non è tra i più favorevoli, ma anche la posizione è tale da subire maggiormente l'ombra proiettata dalla parete i 3P. Infatti la stringa Nord-Ovest è posizionata parallela alla parete e rivolta verso di esse, dunque al pomeriggio l'ombra si estenderà direttamente per tutta la lunghezza della stringa. Viceversa la stringa Sud-Est è quella che subisce meno variazioni, tanto da essere trascurabili: infatti la stringa è sì parallela alla parete ma è orientata nel verso opposto, quindi l'ombra impiega più tempo ad oscurare la stringa. Infine le stringhe Sud-Ovest e Nord-Est presentano risultati molto simili: esse sono posizionate lungo i lati corti del modulo e l'ombra della parete parte inizialmente dall'angolo della stringa per poi svilupparsi. Infatti la riduzione è molto simile, la differenza sta nella diversa inclinazione. Si riportano prima i risultati sotto forma di tabella e poi sotto forma grafica nell'immagine 5.16.

Riduzione dovuta all'ombreggiamento [%]				
mesi	Stringa SO	Stringa SE	Stringa NO	Stringa NE
Gennaio	5,3	0,5	11,27	5,0
Febbraio	5,5	0,5	10,0	4,7
Marzo	5,8	0,5	9,3	4,5
Aprile	6,6	0,6	9,7	4,9
Maggio	6,1	0,6	8,5	4,7
Giugno	5,8	0,6	8,0	4,54
Luglio	5,7	0,6	7,6	4,3
Agosto	5,6	0,6	8,0	4,2
Settembre	6,4	0,6	9,5	4,6
Ottobre	5,9	0,5	10,2	4,7
Novembre	5,9	0,5	11,1	4,9
Dicembre	5,4	0,5	12,1	5,6

Tabella 5.1: Confronto delle produzioni medie giornaliere delle diverse stringhe

Dal grafico si osserva che le stringhe Sud-Ovest e Nord-Est subiscono una riduzione dell'energia quasi costante durante tutto l'anno. La riduzione è più importante nei mesi invernali perché l'effetto dell'ombra è più rilevante in quanto le ore a disposizione sono minori e in più si ha anche l'effetto della schermatura della parete. Questa tendenza è molto evidente per la stringa Nord-Ovest: il minimo di riduzione si ha a luglio, del 7%, mentre a dicembre la riduzione è molto pesante e si attesta al 12%. Questi risultati hanno molta importanza sulla produzione, infatti quando nel 7.2 si parlerà dell'accoppiamento tra i carichi elettrici e la produzione da fotovoltaico, si noterà il peso sia dell'orientamento sfavorevole sia dell'ombreggiatura. I mesi invernali infatti sono molto penalizzati: tra le

varie soluzioni si potrebbe spostare la stringa Nord-Ovest quanto più possibile verso il bordo del tetto dell'edificio in modo da ritardare la proiezione dell'ombra; oppure si potrebbe orientare la stringa verso Sud-Est come la stringa adiacente sopra la Sala Studio 2. Infine l'ultima stringa orientata Sud-Est è quella che patisce meno l'effetto dell'ombreggiatura, proprio perché è l'ultima ad essere colpita dall'ombra.

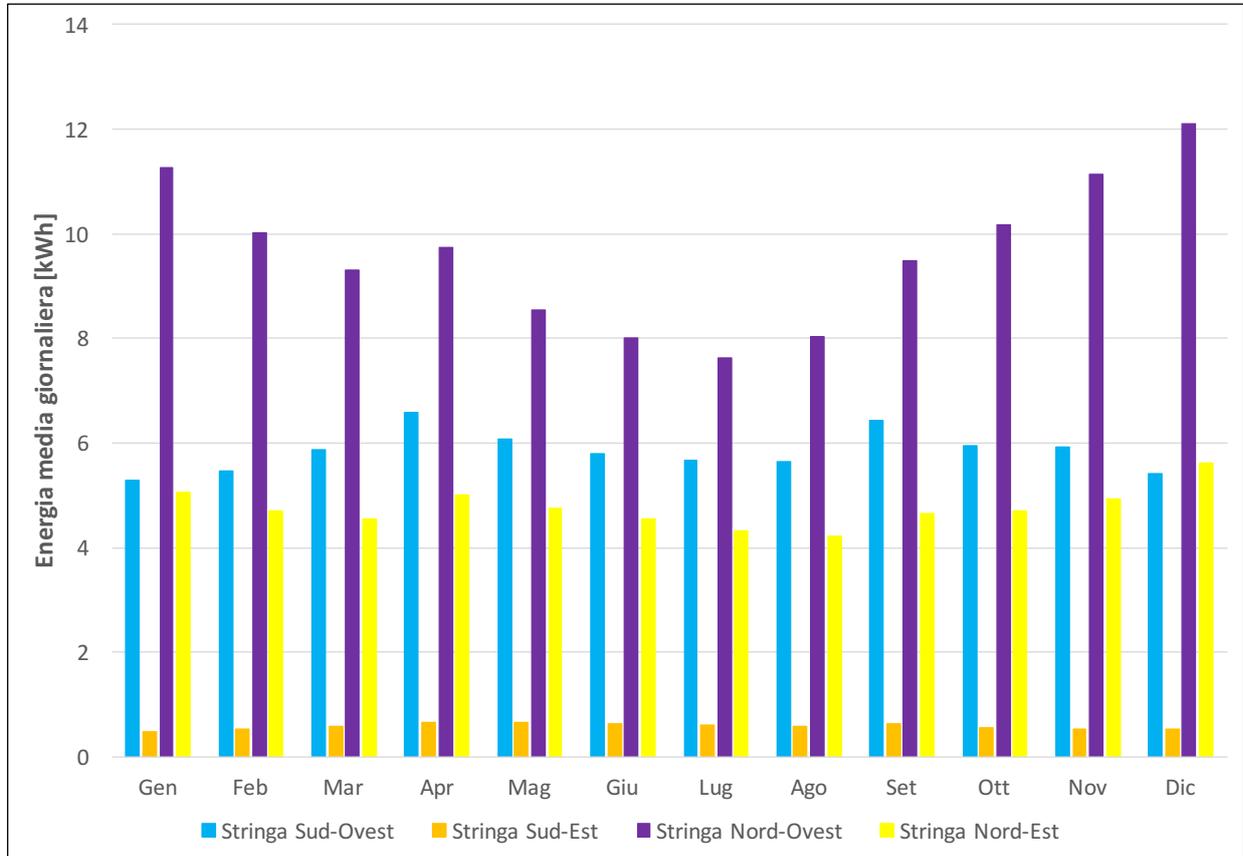


Figura 5.16: Riduzione dovuta all'ombreggiamento per tutte le stringhe

5.5 Analisi della produzione del generatore fotovoltaico

5.5.1 Metodi di calcolo

Il generatore fotovoltaico consta di 4 stringhe da sei pannelli e tre inverter per la conversione della corrente da continua (DC) ad alternata (AC). Il primo inverter si occupa di convertire la corrente delle stringhe Sud-Ovest e Nord-Est, il secondo della stringa Sud-Est e l'ultimo della stringa Nord-Ovest. L'obiettivo di avere tre inverter è di associare i consumi di ogni zona termica con la produzione di energia delle stringhe fotovoltaiche. L'aggiunta di batterie al litio per l'accumulo garantirà una maggiore flessibilità e consentirà di compensare la differenza tra consumi e produzione di energia. Infatti la stringa orientata Nord-Ovest e posizionata sopra l'aula studio 2 difficilmente sarà in grado di coprire tutto il carico elettrico, essendo l'orientamento molto sfavorevole.

Si sono utilizzati tre metodi per il calcolo della producibilità; si riportano tutti e tre con le rispettive ipotesi e si andranno a confrontare i risultati. I primi risultati si sono ottenuti tramite il software Energy Plus: è possibile inserire i dati per il circuito equivalente alla voce *Photovoltaic Performance: Equivalent One Diode*. Questo oggetto permette di inserire i seguenti valori necessari alla descrizione del circuito: la corrente di corto circuito I_{sc} e di massima potenza I_m , la tensione a vuoto U_{oc} e di massima potenza U_m , il coefficiente di temperatura della corrente di corto circuito α_{sc} in A/K e della tensione a vuoto β_{oc} in V/K. Inoltre è necessario specificare i parametri riguardanti le condizioni standard e le condizioni NOCT. I dati riferiti alla NOCT sono stati ricavati dal software open source del NREL (*National Renewables Energy Lab*) *System Advisor Model*, abbreviato in SAM, tramite il quale è possibile scegliere il modulo SP-X-22-360 con relativa scheda tecnica. Il valore per la *shunt resistance* è stato lasciato di default dal software e pari $10^6 \Omega$, per gli altri sono stati scelti i seguenti:

- Temperatura NOCT pari a $46,8^\circ\text{C}$;
- $\alpha_{I_{sc}} = 0,002 \text{ A/K}$;
- $\beta_{U_{oc}} = - 0,1674 \text{ V/K}$;
- $I_m = 5,9 \text{ A}$, $I_{sc} = 6,5$;
- $U_m = 60,6 \text{ V}$, $U_{oc} = 69,5 \text{ V}$;

Il passaggio successivo è la definizione dei generatori fotovoltaici alla voce *Electric Load Center: Generator* : per ogni stringa si specifica il nome, il metodo di calcolo (nel caso in esame il circuito a diodo equivalente), la potenza nominale di 2160 W e la schedule da associare. La variabile in output che definisce la produzione delle stringhe è *Generator Produced DCElectric Power* che restituisce i valori della potenza in W per ogni ora dell'anno. I valori in uscita sono al netto delle perdite lato DC, per ottenere il valore di potenza lato AC si moltiplica per il rendimento dell'inverter pari a 0,976. Con questo metodo si ottengono i seguenti risultati:

La stringa orientata verso sud-ovest è quella che produce più energia nel corso dell'anno , seguita da quella a sud-est. La prima produce più della seconda poiché è maggiormente esposta verso sud, essendo l'azimuth di 26° . La stringa a nord-ovest è la peggiore sia per l'orientamento sfavorevole sia per l'influsso della parete dell'edificio I3P; la stringa

Energia annuale prodotta [kWh/y]			
Generatore SO	Generatore SE	Generatore NO	Generatore NE
2412,35	2289,56	1750,63	1888,74

orientata a nord-est è anch'essa penalizzata ma la sua potenza va sommata a quella della stringa sud-ovest poiché sono servite da un unico inverter: si ha una potenza complessiva di 4301,09 kWh/y.

Il secondo metodo per il calcolo della producibilità vede l'utilizzo del software SAM. L'interfaccia è di semplice utilizzo e consente di definire tutti i dati necessari alla simulazione di un impianto fotovoltaico residenziale. Come per Energy Plus, il software utilizza un file meteo in formato EPW che rappresenta l'anno tipo e per la simulazione si è utilizzato lo stesso file meteo impiegato in Energy Plus. SAM permette di scegliere i moduli fotovoltaici e gli inverter da un catalogo messo a disposizione dal software che restituisce in output le relative schede tecniche. Il modulo fotovoltaico è stato trovato nel catalogo, per l'inverter si sono inseriti i valori manualmente basandosi sulla scheda tecnica fornita da ABB. L'oggetto *System Design* serve a descrivere la struttura del generatore: si specificano i moduli per ogni stringa, il numero di stringhe e di inverter e l'orientamento e inclinazione della stringa. L'effetto dell'ombreggiamento è calcolato alla voce *Shading and Snow* che consente di rappresentare graficamente l'edificio, le stringhe e gli elementi ombreggianti.

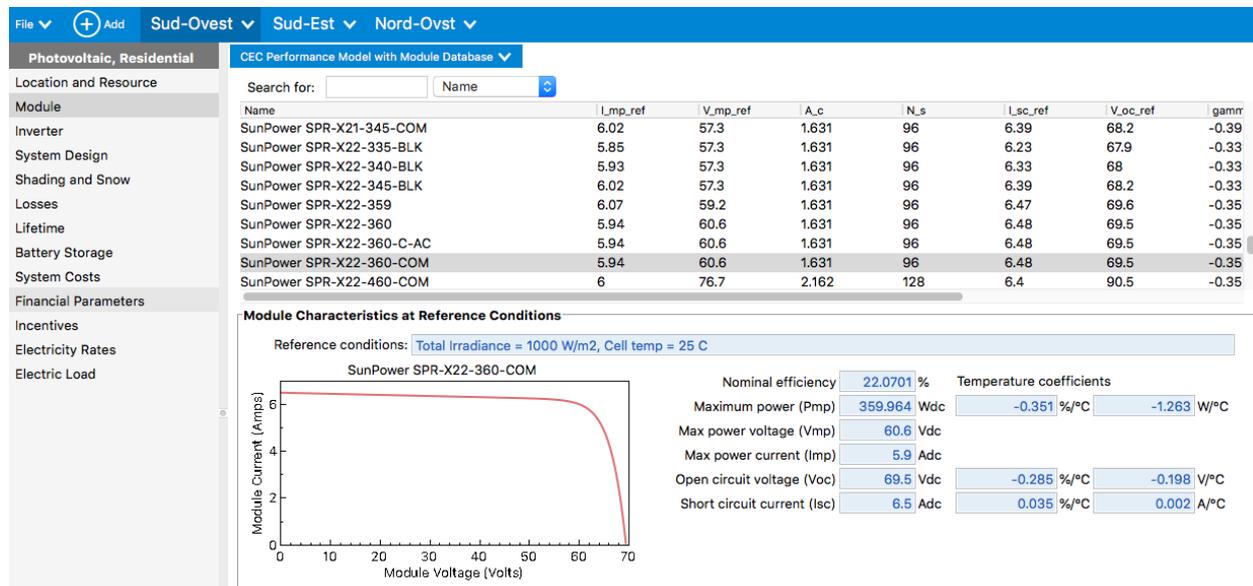


Figura 5.17: Interfaccia del software SAM

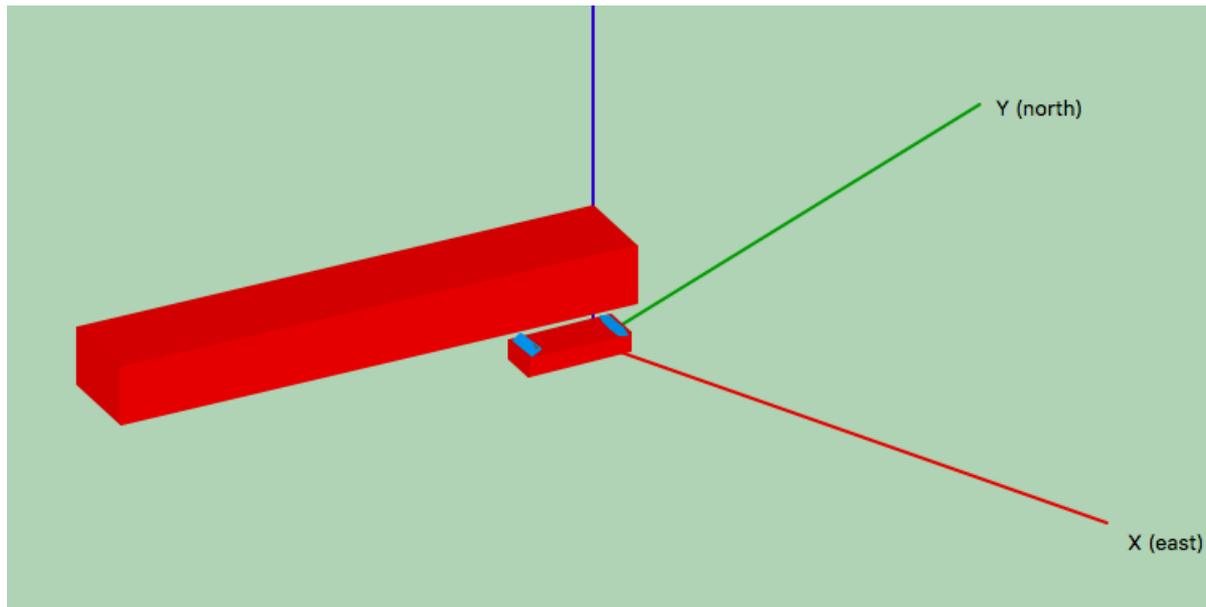


Figura 5.18: Interfaccia per il calcolo dell'ombreggiamento del il software SAM

Energia annuale prodotta [kWh/y]			
Software	Generatore SO/NE	Generatore S-O	Generatore N-O
Energy Plus	4301,09	2289,56	1750,63
System Advisor Model	4154	2191	1777
Errore relativo	3,41	4,3	-1,5

Tabella 5.2: Confronto dei risultati dei due software

Dal manuale [25] del software scaricabile dal sito, si legge che anche SAM utilizza l'approccio del circuito a diodo equivalente, pertanto ci si aspetta che i valori siano simili al caso precedente. Si riportano i valori relativi ai due casi, considerando come primo generatore la somma dell'energia del pannello esposto a Sud-Ovest e di quello a Nord-Est:

Dai risultati si osserva che i due software hanno ottenuto i medesimi risultati con una differenza percentuale massima del 4,3%. Questa differenza può essere dovuta a molti fattori: una leggera differenza di posizionamento della parete de I3P che causa delle differenze nell'ombreggiamento, una distanza diversa dalla ringhiera, il posizionamento non perfettamente coincidente delle stringhe fotovoltaiche. Le differenze dipendono principalmente per motivi di modellazione geometrica degli elementi e non dalle condizioni meteorologiche poiché il file di input è lo stesso.

L'ultima analisi è stata effettuata utilizzando la seguente formula:

$$P = P_{nominale} \cdot k_{potenza} \cdot \eta_{perdite} \cdot \eta_{PCU} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (5.2)$$

dove:

- $P_{nominale}$ è la potenza nominale dell'impianto, W;
- il coefficiente di potenza $k_{potenza}$ rappresenta le perdite dovute all'aumento di temperatura e si valuta:

$$k_{potenza} = 1 + \gamma \cdot (T_{cella} - 25) \quad (5.3)$$

dove γ è il coefficiente di riduzione della potenza in funzione della temperatura ed è riportato sui dati di targa e la T_{cella} si calcola come esposto nel paragrafo 2.2 con la formula 2.20.

- $\eta_{perdite}$ tiene conto di tutte le perdite lato DC: differenza rispetto alle condizioni STC, sporcizia del modulo, differenza nello spettro solare rispetto a quello di riferimento con massa d'aria pari ad 1,5, sovra-temperatura, effetto di ombreggiamento, mismatch costruttivo. Il valore di riferimento è 0,92;
- η_{PCU} che comprende le perdite di conversione da DC ad AC e le perdite dell'MPPTracker. Il valore assunto è pari a 0,976 come riportato dai dati di targa di ABB.

Da Energy Plus si sono impostate come *Output Variables* la temperatura di bulbo secco esterna e l'irradianza totale sulle stringhe che sono gli unici dati necessari per calcolare la temperatura della cella. I dati per il coefficiente di riduzione di potenza, γ e la T_{NOCT} sono stati acquisiti da SAM.

Energia annuale prodotta [kWh/y]		
Generatore SO/NE	Generatore SE	Generatore NO
4679,21	2472,90	2123,17

Tabella 5.3: Risultati utilizzando la formula

5.5.2 Risultati

Si è scelto di usare i risultati del primo caso ottenuti con Energy Plus, in quanto si ritengono essere affidabili. Si riportano i valori ottenuti prima partendo dai valori giornalieri, poi confrontando quelli mensili e infine confrontando i valori annuali. I grafici giornalieri che seguono, mostrano l'andamento dell'energia elettrica prodotta nell'arco di una giornata. L'energia è l'integrale della potenza nel tempo:

$$E_h = \int_{t_0}^{t_1} P(t), dt \quad (5.4)$$

in questo studio l'intervallo di tempo in cui il software ha calcolato la potenza è 1 h, quindi la formula è riscritta nel seguente modo:

$$E_h = P_m \cdot (t_1 - t_0) \quad (5.5)$$

dove P_m è la potenza media fornita da Energy Plus e l'intervallo $(t_1 - t_0)$ è pari ad 1 h. Risulta allora che l'energia ha unità di misura kWh.

La prima analisi della producibilità riguarda l'andamento giornaliero dell'energia prodotta per 4 giorni dell'anno. Si è scelto di analizzare un giorno per ogni stagione e il numero scelto è il 15 per Gennaio, Luglio e Ottobre e l'13 per Aprile poiché il 15 si tratta di una giornata nuvolosa.

Il 15 Gennaio è un giorno invernale e ci si aspetta valori di producibilità in generale bassi e con una marcata differenza tra le stringhe orientate verso Sud e quelle verso Nord. Infatti la stringa Sud-Ovest presenta la produzione media più elevata nell'arco della giornata e ha un picco alle ore 14:00 di 1157 Wh contro il picco della stringa Nord-Ovest, sempre alle 14:00, di 405,05 Wh. In questa giornata la stringa Nord-Ovest ha un valore massimo maggiore rispetto a quella Nord-Est di 375,19 Wh. Dal grafico è anche possibile notare che per i pannelli ad Est la produzione è spostata nelle ore mattutine, viceversa per quelli esposti verso Ovest.

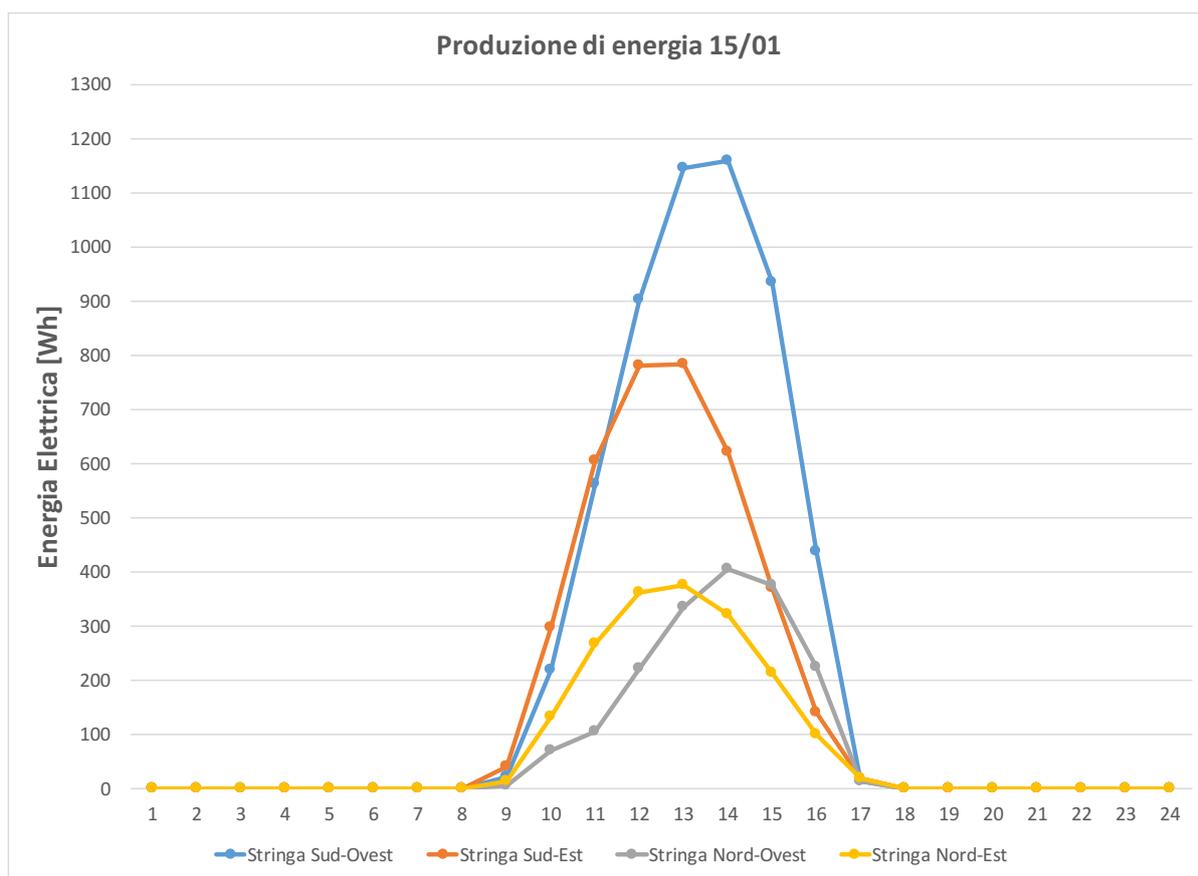


Figura 5.19: Confronto produzione di energia giornaliera per il 15 gennaio

Nella giornata del 13 aprile la differenza di produzione tra le diverse stringhe è meno marcata rispetto al caso precedente. I valori sono più elevati, infatti il valore massimo per l'impianto Sud-Ovest è di 2033,94 Wh contro i 1157 di Gennaio. Anche in questo caso si nota come la produzione delle stringhe rivolte verso Est sia favorita al mattino, mentre per quelle a ovest nelle ore pomeridiane. Inoltre anche l'intervallo orario di produzione è nettamente maggiore rispetto a gennaio: dalle 07:00 alle 18:00 contro 09:00-17:00.

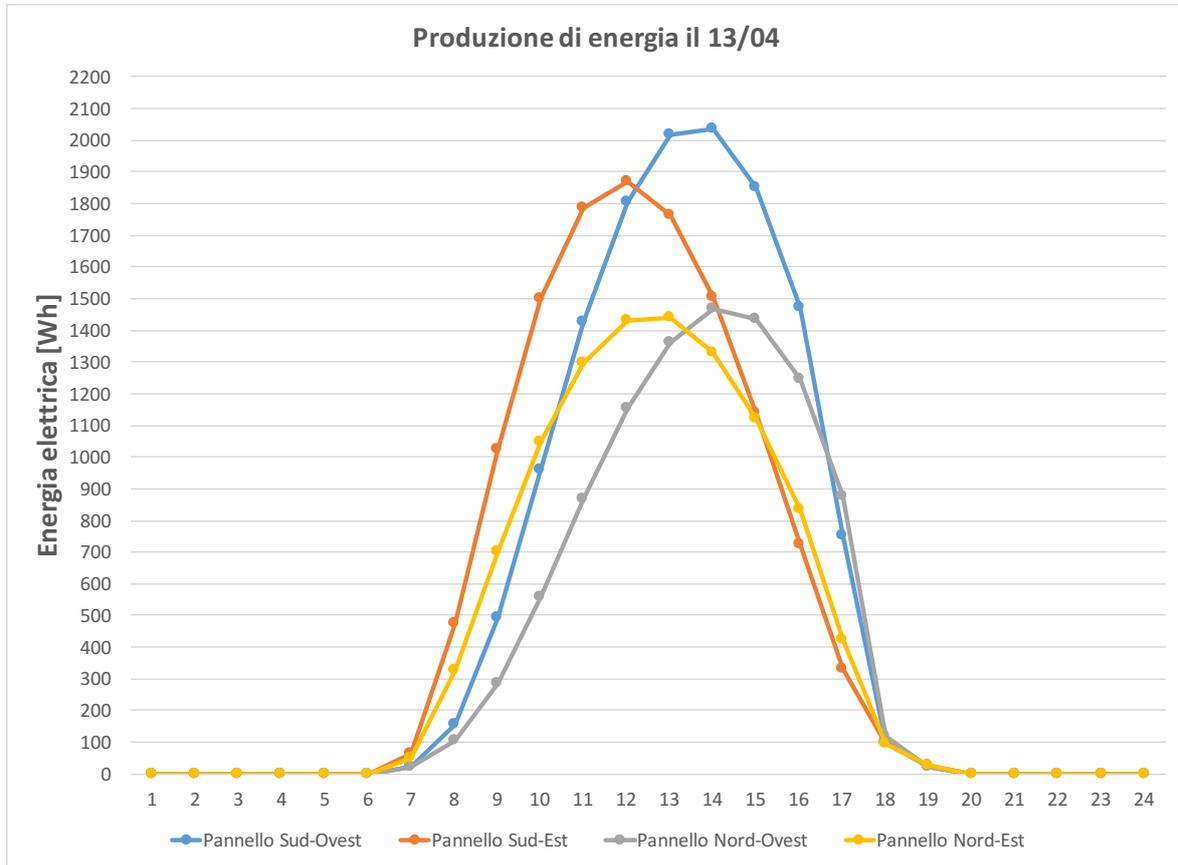


Figura 5.20: Confronto produzione di energia giornaliera per il 13 aprile

Il 15 luglio presenta valori di picco simili a quelli di aprile. La differenza più evidente sta nell'ancor minore distinzione tra i valori di produzione delle stringhe verso Sud e delle stringhe verso Nord. La stringa che presenta il valore più alto è sempre quella a Sud-Ovest, ma ,se si svolge l'integrale delle due curve, risulta che la stringa Sud-Est produce leggermente di più rispetto alla precedente. L'integrale si è svolto su excel con il metodo dei trapezi, quindi è un'approssimazione. La fascia oraria di produzione di energia è più ampia: dalle 07:00 alle 19:00.

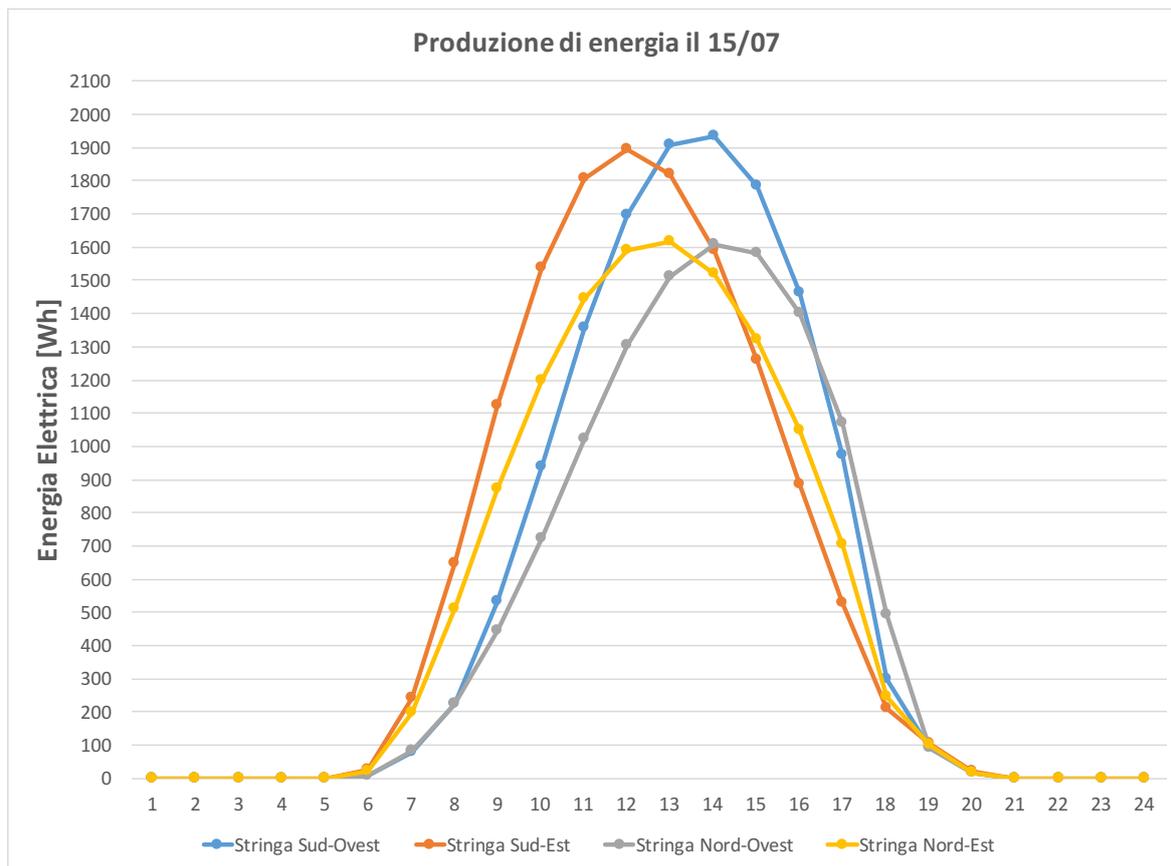


Figura 5.21: Confronto produzione di energia giornaliera per il 15 luglio

Nel mese di ottobre i valori dell'energia si abbassano in accordo con le medie mensili. Infatti il picco massimo si ha sempre per la stringa a Sud-Est per un valore di 1483 Wh alle ore 13:00. La differenza tra le diverse stringhe torna ad accentuarsi, con la stringa Nord-Est che produce la metà di quella Sud-Ovest. Anche l'intervallo orario è più ristretto, dalle 08:00 alle 17:00, a pur sempre con un'ora in più di produzione al mattino rispetto a gennaio. Anche in questo caso è evidente la differenza oraria tra i picchi di produzione per le diverse esposizioni Est e Ovest.

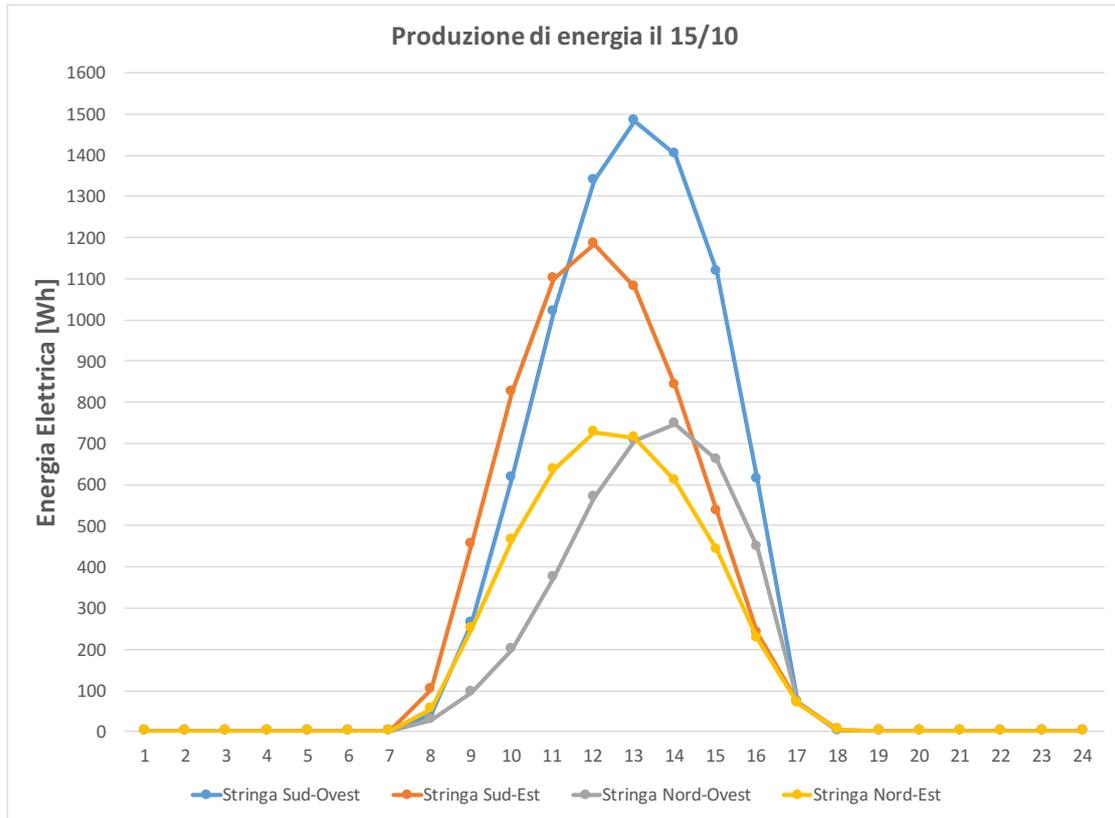


Figura 5.22: Confronto produzione di energia giornaliera per il 15 ottobre

In seguito si è analizzata la produzione media giornaliera per ogni mese dell'anno e per ogni stringa. Si nota subito che nei mesi di novembre, dicembre e gennaio la producibilità delle stringhe orientate a Nord è ridotta della metà rispetto alle altre due stringhe: la stringa Sud-Ovest produce 3,33 kWh/d contro i 1,44 kWh/d di quella Nord-Ovest e i 1,57 kWh di quella Nord-Est. Tra quelle orientate a Nord, quella Nord-Ovest è la peggiore sia per l'orientamento sfavorevole sia a causa della maggiore incidenza dell'ombreggiamento dovuto alla parete de I3P.

Nei mesi da maggio a luglio la stringa che genera più energia giornaliera è quella Sud-Est. Il divario tra le stringhe è ridotto durante questi mesi: infatti l'inclinazione di 20° di quella Nord-Ovest e di 10° di quella Nord-Est favoriscono la produzione estiva a discapito di quella invernale; la peggiore si rivela essere sempre quella orientata Nord-Ovest. Il fatto che la stringa Sud-Est superi nei suddetti la stringa Sud-Ovest può essere dovuto alla differenza di radiazione che colpisce i pannelli. Infatti entrambi risentono nello stesso modo dell'ombreggiamento della parete de I3P, ma la stringa orientata più verso Est riceve una quota maggiore di irraggiamento nelle ore mattutine fino al primo pomeriggio quando l'intensità della radiazione è maggiore.

Produzione media giornaliera [kWh/d]				
mesi	Stringa SO	Stringa SE	Stringa NO	Stringa NE
Gennaio	3,33	2,59	1,44	1,57
Febbraio	5,13	4,17	2,74	2,90
Marzo	6,43	5,71	4,14	4,42
Aprile	7,56	7,52	5,72	6,30
Maggio	9,07	9,25	7,79	8,35
Giugno	9,81	10,39	8,79	9,53
Luglio	11,11	11,45	9,60	10,31
Agosto	10,05	9,90	7,86	8,48
Settembre	7,19	6,68	4,95	5,35
Ottobre	5,01	4,30	2,85	3,09
Novembre	3,66	2,86	1,70	1,81
Dicembre	2,71	2,10	1,21	1,27

Tabella 5.4: Confronto delle produzioni medie giornaliere delle diverse stringhe

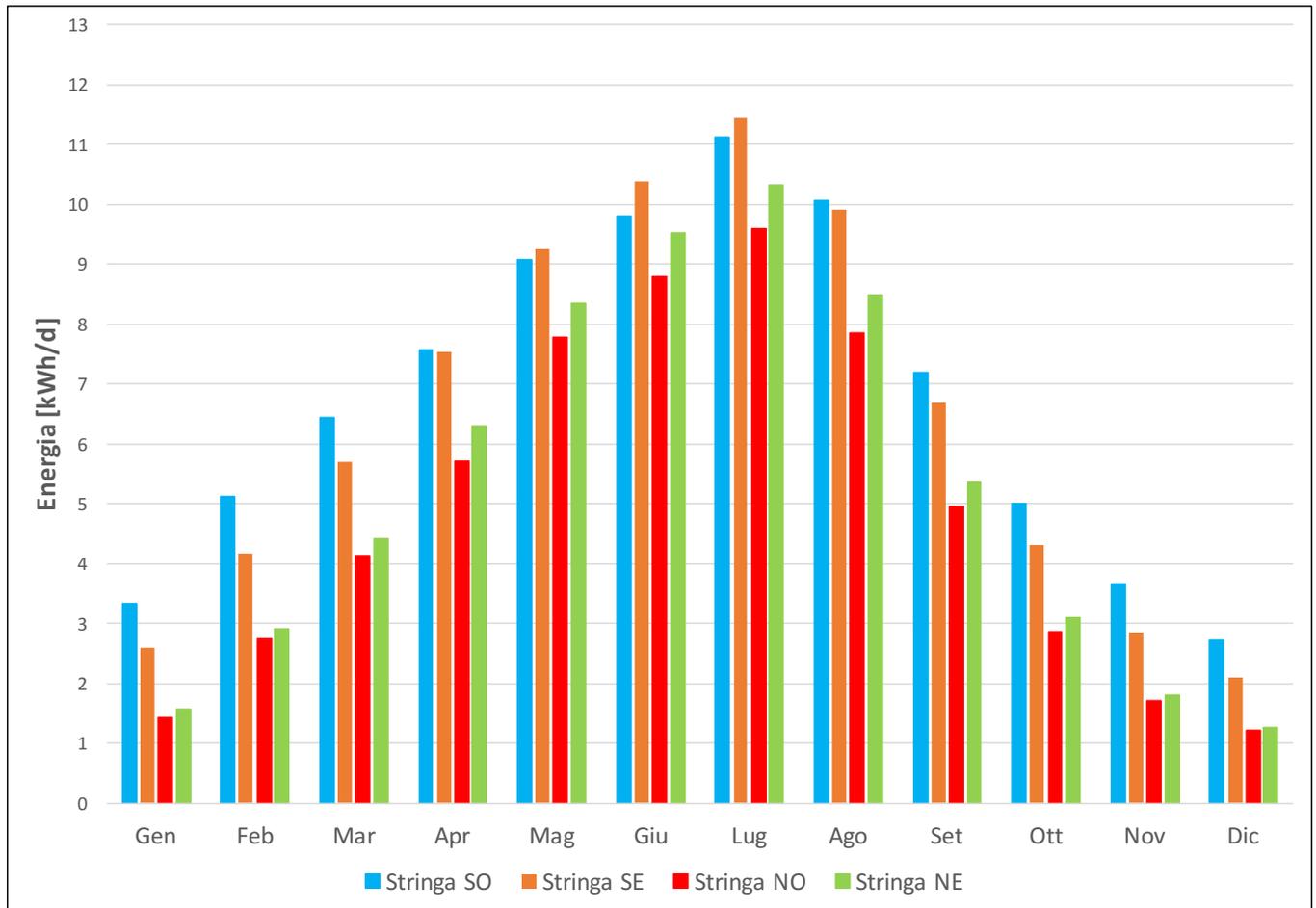


Figura 5.23: Confronto sulla produzione media giornaliera delle diverse stringhe

L'ultima analisi riguarda la produzione annuale. La stringa orientata a sud-ovest presenta i picchi più alti di potenza, superiori ai 2000 W, nei mesi da aprile a giugno. Globalmente i valori sono più elevati rispetto alle altre stringhe per tutti i mesi e soprattutto nel mese di dicembre si ottengono valori accettabili intorno ai 1000 W durante le giornate soleggiate. Da marzo a settembre la produzione di potenza è spesso superiore ai 1800 W, fatto che nelle altre stringhe non trova riscontro. Come confermato anche nei precedenti capitoli, l'orientamento prevalente verso Sud consente di massimizzare la produzione e l'inclinazione di 30° consente di sfruttare al meglio l'energia solare durante il periodo estivo. Quest'ultima considerazione è evidente dall'andamento della potenza durante l'arco dell'anno:

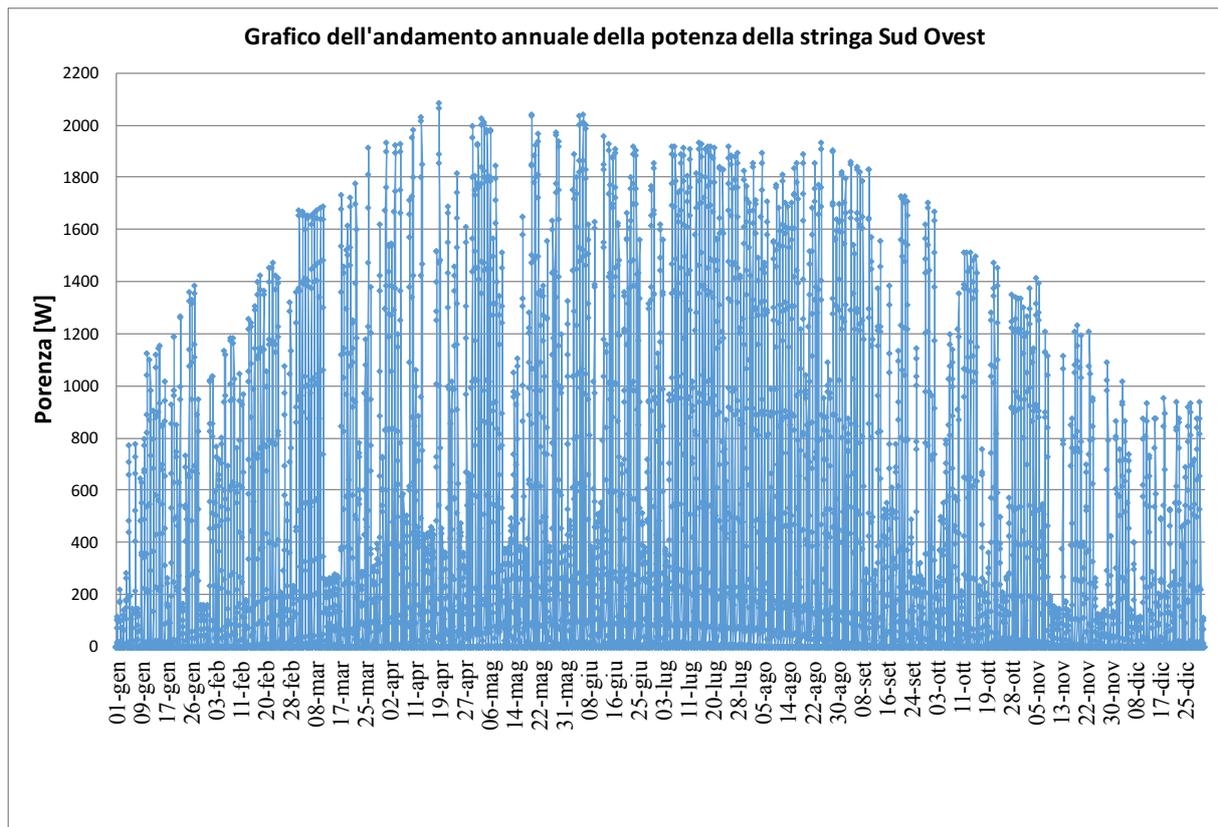


Figura 5.24: Grafico produzione annuale stringa Sud Ovest

La stringa orientata a Sud-Est è maggiormente esposta verso Est e questo si riflette anche sulla producibilità. I valori della potenza [W] nei mesi invernali e autunnali sono mediamente più bassi, per esempio il 30 dicembre nella stringa SO si ottengono 820 W contro i 600 di quella in esame. Il picco di potenza si raggiunge il 6 giugno alle ore 12:00 per un valore di 1998 W, in nessun'altra giornata dell'anno si ottiene un valore superiore o comparabile. Si evince che non solo la produzione è globalmente inferiore, ma non si raggiungono neanche valori massimi comparabili al caso precedente. Infatti il picco nel primo caso si ottiene il 19 di aprile alle ore 13:00 per un valore di 2068 W.

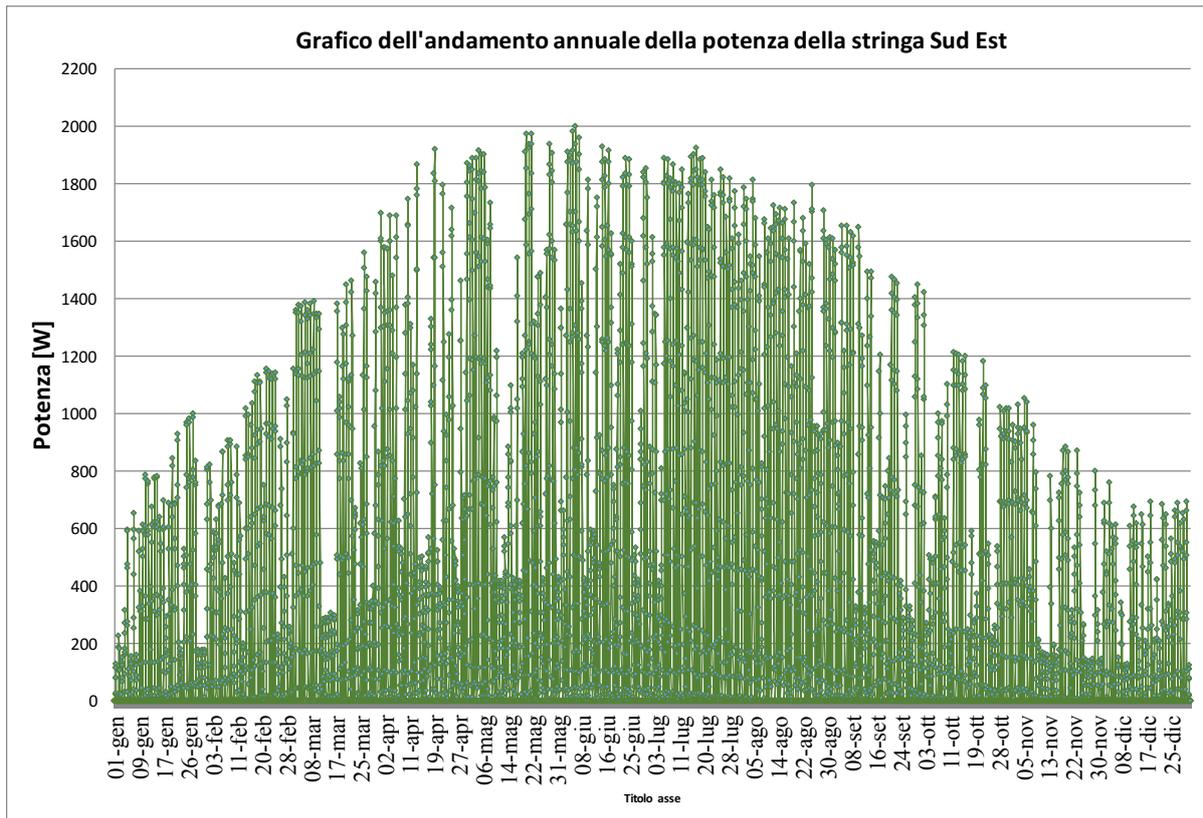


Figura 5.25: Grafico produzione annuale stringa Sud-Est

Le ultime due stringhe, orientate Nord-Ovest e Nord-Est, presentano un andamento annuo molto simile. Entrambe mostrano una differenza sostanziale tra i mesi con maggiore soleggiamento da maggio ad agosto rispetto ai rimanenti. Infatti la stringa orientata Sud-Ovest soffre la riduzione di producibilità nei mesi invernali e autunnali ma la differenza rispetto alle stringhe in esame è molto meno marcata. Infatti nella stringa a Nord-Ovest si raggiungono i 1695 W il 5 giugno alle ore 14:00 contro i 352 W del 29 dicembre sempre alle ore 14:00: la differenza in questo caso è notevole. La scelta di inclinare le due stringhe per favorire la produzione estiva si riflette nei seguenti grafici:

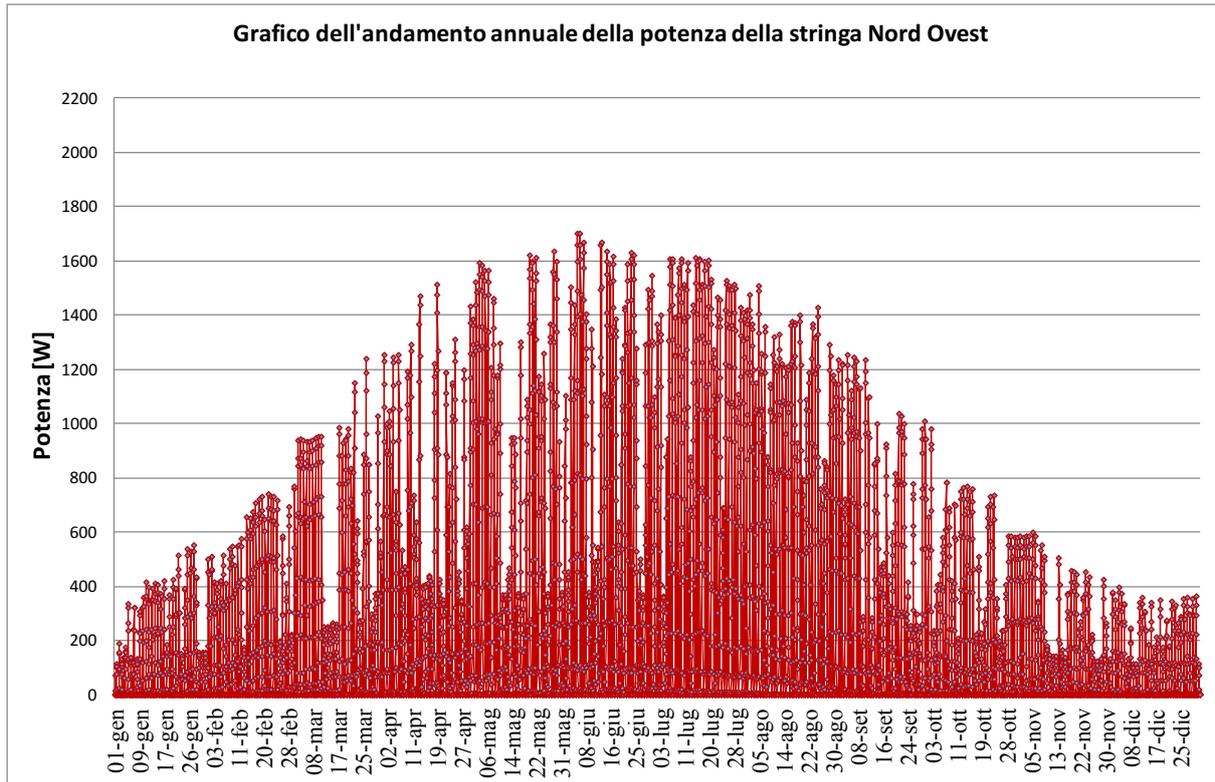


Figura 5.26: Grafico produzione annuale stringa Nord Ovest

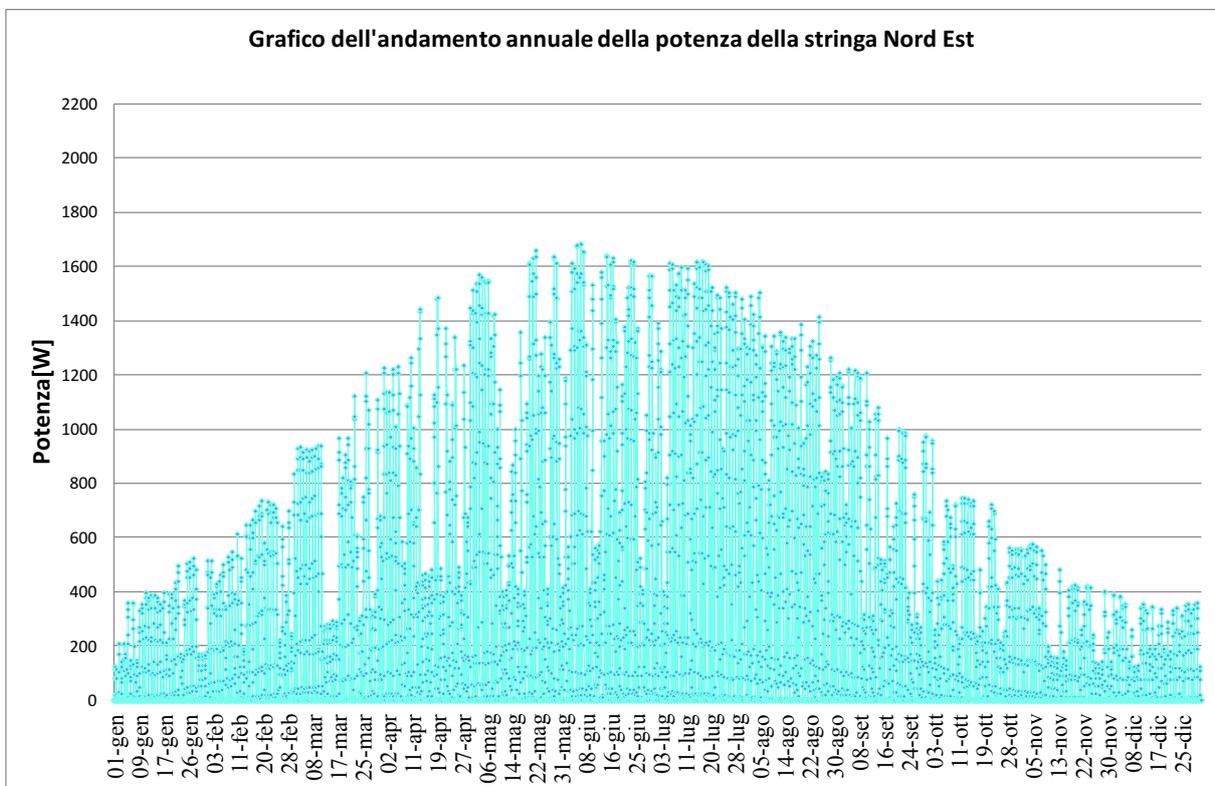


Figura 5.27: Grafico produzione annuale stringa Nord Est

Capitolo 6

Risultati della simulazione Termoenergetica dell'edificio

6.1 Progetto termico dell'involucro

6.1.1 Calcolo della trasmittanza termica degli elementi edilizi

La definizione della stratigrafia è uno degli elementi chiave per la caratterizzazione termica dell'edificio e la sua ottimizzazione è fondamentale per raggiungere i requisiti richiesti dallo standard *Passivhaus*. E' necessario studiare il comportamento sia dell'involucro opaco sia di quello trasparente ed in particolare ridurre il valore della trasmittanza termica di entrambi. Dato un componente edilizio che separa due ambienti a temperature differenti (tipicamente ambiente esterno da interno), la trasmittanza termica unitaria del componente è definita come la potenza termica che attraversa tale componente per unità di superficie e in presenza di una differenza di temperatura unitaria tra i due ambienti [26]. Ne consegue che la sua unità di misura nel Sistema Internazionale è $[W/(m^2K)]$ e matematicamente è definita come:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^{n_1} \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^{n_2} R_j + \frac{1}{h_e}} \quad (6.1)$$

dove i termini rappresentano:

- h_i e h_e sono i coefficienti di scambio termico liminare interno ed esterno definiti dalla norma UNI EN ISO 6946;
- R_j è la resistenza termica del j-esimo elemento definita nelle norme UNI 10355 e UNI EN ISO 6946;
- λ_j è la conducibilità termica del j-esimo elemento , misurata in $[W/(mK)]$ e definita nella norma UNI 10351;
- d_j è lo spessore del j-esimo elemento [m]

E' importante evidenziare che minore è il valore della trasmittanza termica , migliore è l'isolamento dell'involucro. Per diminuire il valore della trasmittanza si può operare sia diminuendo la conducibilità termica sia aumentando lo spessore della parete: infatti una

minore conducibilità implica una maggiore difficoltà di trasmissione del calore via conduzione ed è quindi possibile limitare le perdite di calore dall'ambiente interno riscaldato verso l'esterno che avvengono per conduzione.

Lo standard del PASSIVHUAS INSTITUTE prescrive i seguenti valori di trasmittanza per i componenti opachi e trasparenti :

- per gli involucri opachi situati in regioni con temperature invernali rigide $U=0,15$ $[W/(m^2K)]$;
- per quanto l'involucro trasparente i telai devono essere ben isolati e la vetratura deve avere una bassa emissività e deve essere riempita con gas come Argon e Krypton per ridurre la trasmissione del calore. Il valore di trasmittanza deve essere almeno $U=0,80$ $[W/(m^2K)]$.

6.1.2 Stratigrafia originaria

Successivamente è necessario descrivere la stratigrafia originaria ,fornita dalla start-up *be-eco* ,che si compone come segue:

- Copertura : la copertura è costituita dall'esterno verso l'interno da una guaina impermeabile realizzata con materiale ad alta riflettanza ed emissività termica di spessore 3 mm. Segue un pannello OSB ("Oriented Strand Board") in legno di pioppo di spessore 25 mm che anticipa un'intercapedine d'aria non ventilata dello spessore di 140 mm. Lo strato di isolante è costituito da Sughero tostato del tipo Corkpan, la tostatura non altera le caratteristiche del sughero, anzi le migliora, in quanto permette al granulo di espandersi, senza inglobare aria e migliorandone le caratteristiche di coibenza e inoltre è un materiale riciclabile al 100 % . L'ultimo strato è costituito da un pannello di OSB dello spessore di 25 mm. Lo spessore totale della copertura è dunque di 29,3 cm:

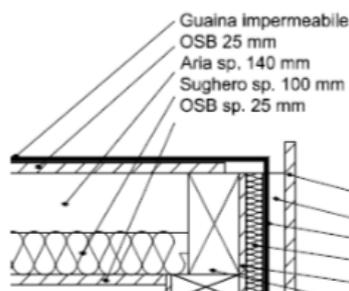


Figura 6.1: Stratigrafia copertura

- Solaio: il primo strato a contatto con l'ambiente esterno è costituito dall'isolante, uno strato di sughero tostato Corkpan dello spessore 100 mm a cui segue un'intercapedine d'aria di 60 mm. Gli ultimi due strati sono costituiti, in ordine, dalla guaina impermeabile e da un pannello OSB in legno di pioppo di 25 mm. La condizione al contorno da porre su Energy Plus per il solaio non è *Ground*, ma *Surface Outside* con *No Sun*, *No Wind* poiché il modulo non è direttamente a contatto con il terreno ma leggermente rialzato. Lo spessore totale del solaio è di 18,8 cm:

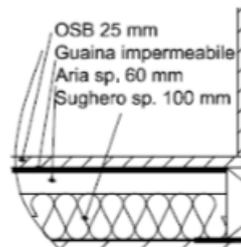


Figura 6.2: Stratigrafia solaio

- Pareti con esposizione Nord-Est e Sud-Ovest: si tratta dei lati più lunghi dell'edificio e hanno la medesima stratigrafia. A contatto con l'esterno è presente un pannello OSB di legno di pioppo di 21 mm a cui segue lo strato di guaina impermeabile di 3 mm. Lo strato successivo è costituito da un pannello sandwich formato da due strati esterni di sughero rispettivamente di 40 e 60 mm e da un nucleo di OSB di 15 mm. Infine un'intercapedine di aria di 100 mm e di OSB di 15 mm chiudono la composizione della parete. Lo spessore totale della parete è di 25,4 cm:

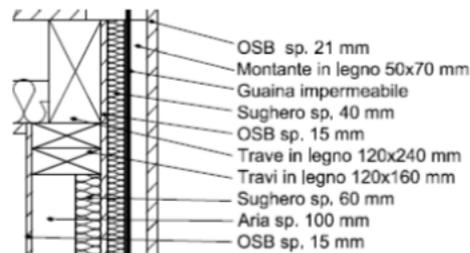


Figura 6.3: Stratigrafia pareti Nord-Est e Sud-Ovest

- Parete con esposizione Nord-Ovest: questa è la parete che riceve meno apporti solari e pertanto deve essere ben coibentata. La stratigrafia prevede un pannello di OSB di 21 mm , la guaina impermeabile , l'isolante in sughero di 40 mm , un pannello XLAM di 80 mm e un ulteriore pannello OSB di 15 mm per uno spessore totale di 15,9 cm.

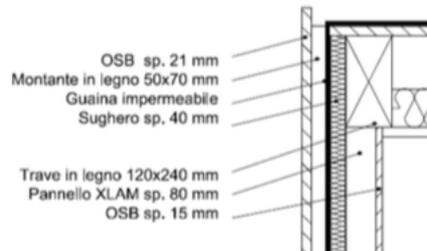


Figura 6.4: Stratigrafia parete Nord-Ovest

- Parete con esposizione Sud-Est: è la parete che presenta i maggiori contributi solari ed è costituito da uno strato di sughero MD di spessore 50 mm a cui seguono un pannello di XLAM di 80 mm e uno di OSB di 15 mm. Il sughero MD è un materiale a maggiore densità del sughero tostato ed è stato utilizzato per isolare a cappotto la parete. Lo spessore totale della parete è di 14,5 cm.

Per quanto riguarda il componente trasparente , si è considerata una porta finestra a doppi vetri con un intercapedine di Argon di 13 mm per ridurre le perdite di calore. Le caratteristiche termofisiche del vetro sono state ricavate dalla sezione *WindowGlassMaterial* ed è stato scelto il vetro CLEAR di spessore 6 mm; l' Argon è stato inserito sotto la voce *WindowMaterial:Gas* dove è possibile scegliere tra tipi di gas predefiniti.

Una volta definita la stratigrafia , si fa partire la simulazione su Energy Plus così da ottenere il valore di trasmittanza termica. Terminata la simulazione, alla voce *Tables* è possibile accedere a tutte le informazioni inerenti il modulo abitativo, in particolare interessa la voce *Envelope Summary* che contiene tutte le caratteristiche termotecniche:

Dove:

- U factor with film indica la trasmittanza comprendente anche le conduttanze termiche;
- la net Area è l'area della parete al netto del componente trasparente.

Avendo i valori di trasmittanza di tutte le pareti , è possibile calcolare il valore medio di U del solo componente opaco pesato sulle aree , il valore medio di U dei componenti trasparenti e infine il valore medio di U per l'intero edificio:

Dai risultati emerge che i valori di trasmittanza sono nettamente maggiori di quelli definiti dallo standard *Passivhaus* ed è quindi necessario procedere con un'adeguata coibentazione.

Componenti	U-factor with film [W/(m²K)]	Net Area [m²]
Copertura	0,303	113,11
Solaio	0,309	113,11
Parete NE	0,474	21,57
Parete SE	0,3	49,68
Parete NO	0,3	46,27
Parete SO	0,311	16,76
Vetrocamera a due ante	2,608	4,81
Vetrocamera a tre ante	2,631	6,52

Tabella 6.1: Valori trasmittanza termica

Area totale [m²]	U opaca [W/(m²K)]	U trasparente [W/(m²K)]	U media [W/(m²K)]
372,95	0,316	2,621	0,385

Tabella 6.2: Risultati trasmittanza termica

6.1.3 Calcoli sulla stratigrafia aggiornata

In questa sezione si fa riferimento alla stratigrafia descritta nel paragrafo 2.2 . A seguito della definizione della nuova stratigrafia si sono svolti i medesimi passaggi dello studio precedente per ottenere i valori di trasmittanza termica:

Componenti	U-factor with film [W/(m²K)]	Net Area [m²]
Copertura	0,116	113,11
Solaio	0,166	113,11
Parete NO	0,175	46,27
Parete SO	0,138	16,76
Parete NE	0,138	21,57
Parete SE	0,175	49,68

Tabella 6.3: Valori trasmittanza termica

Ottenuti i valori di trasmittanza dei singoli componenti è possibile ricavare il valore totale per il componente opaco, per il componente vetrato e la trasmittanza media :

Area totale [m ²]	U opaca [W/(m ² K)]	U trasparente [W/(m ² K)]	U media [W/(m ² K)]
372,95	0,149	1,182	0,18

Tabella 6.4: Risultati trasmittanza termica

In questo caso siamo riusciti a rispettare i limiti imposti dallo standard *Passivhaus* poiché la U_{Opaca} è 0,15 W/(m²K) e la $U_{Trasparente}$ è 0,8 W/(m²K), quindi l'obiettivo è stato raggiunto. Inoltre si sono calcolati i flussi dispersi dai vari componenti per vedere effettivamente il miglioramento globale dell'edificio dal punto di vista termofisico. Il flusso è stato calcolato considerando come differenza di temperatura il salto tra la temperatura interna di setpoint di 20°C e quella esterna di progetto per la città di Torino che è 8°C da cui ne risulta un ΔT di 28°C:

$$\Phi_{Disperso} = U_{Componente} \cdot A_{Componente} \cdot \Delta T \quad (6.2)$$

Stratigrafia originaria					
Componenti	U-Factor film[W/m ² K]	Net Area[m ²]	Flusso originale[W]	Flusso aggiornato[W]	Percentuale riduzione[%]
Copertura	0,3	113,11	959,63	367,38	61,72
Solaio	0,309	113,11	994,46	525,74	47,13
Parete NO	0,296	48,36	417,31	243,43	41,67
Parete SO	0,487	16,76	145,95	63,82	56,27
Parete NE	0,465	21,57	286,28	82,14	71,31
Parete SE	0,296	49,68	417,31	243,43	41,67

Tabella 6.5: Confronto Flussi Dispersi

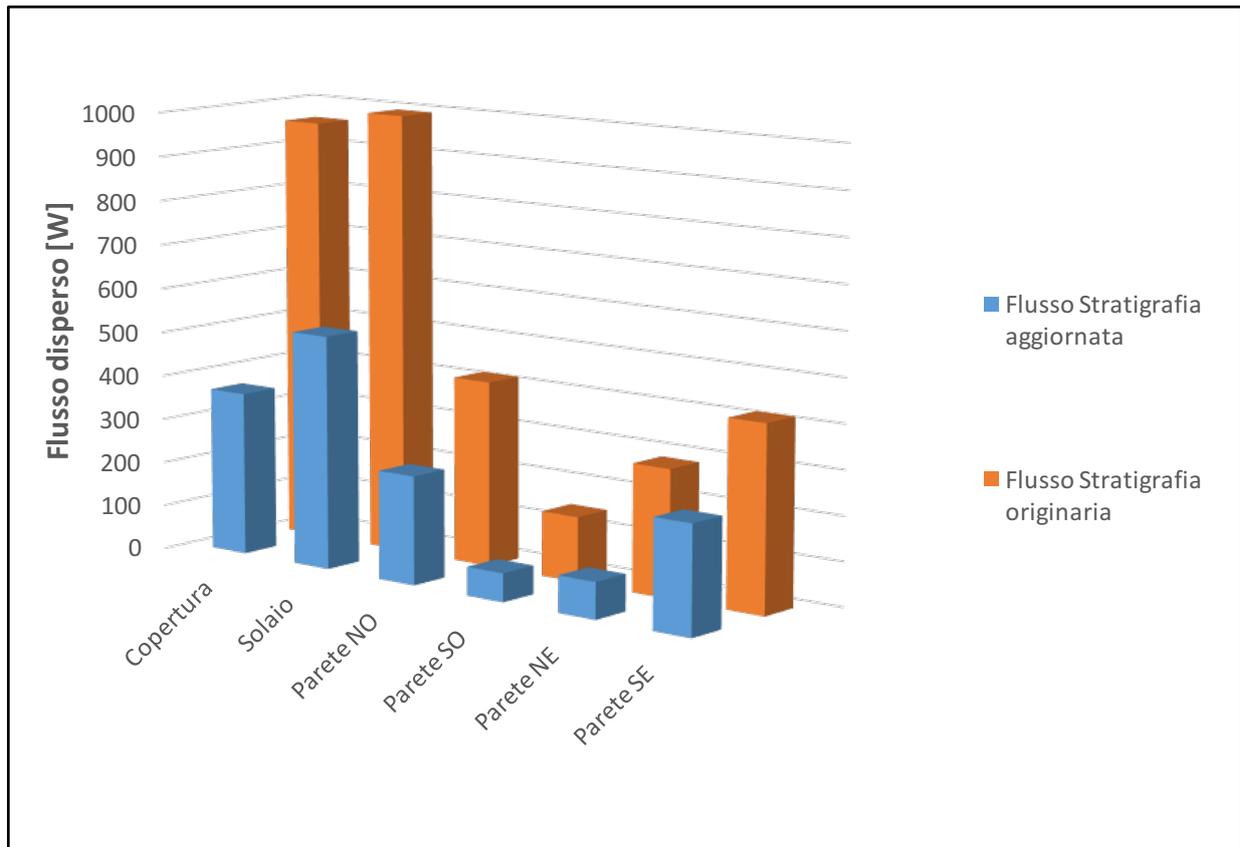


Figura 6.5: Grafico Flussi Dispersi nei due casi studio

L'aggiunta del cappotto di isolante di 20 cm per la copertura e il solaio ha apportato notevoli miglioramenti tanto da avere una riduzione delle perdite del 70 % ; un miglioramento analogo si osserva anche nei lati Nord-Est e Sud-Ovest che nello studio iniziale avevano poco isolante : 50 mm di Sughero MD per il lato Sud-Est e soli 40 mm per il lato Nord-Est. I lati lunghi esposti verso Sud-Est e Nord-Ovest presentano un dimezzamento della trasmittanza termica che porta ad una riduzione del 20 % del flusso disperso. L'isolamento a cappotto ha come vantaggi l'eliminazione dei ponti termici, un'elevata inerzia termica della parete e un miglior confort termico degli occupanti, poiché si innalza la T media radiante; di contro si ha lentezza nel raggiungere la T interna ottimale all'accensione dell'impianto di riscaldamento, a causa dell'elevata inerzia termica delle pareti. L'isolamento in intercapedine presenta come svantaggi l'Impossibilità di riduzione degli effetti dei ponti termici e dubbi sulla durata nel tempo della resistenza *termica*^[26]. Si è optato per entrambe le soluzioni poiché per quanto riguarda le pareti laterali bisogna mantenere dei vincoli architettonici riguardo la distanza dell'edificio dalla ringhiera.

6.2 Calcolo di progetto invernale ed estivo

In questo paragrafo si riportano i risultati della simulazione del giorno progetto per il carico invernale ed estivo. Le ipotesi e i valori ipotizzati sono stati spiegati nel paragrafo 4.5. I risultati per il 15 di gennaio sono stati ottenuti tramite Energy Plus e sono in regime stazionario poiché si è considerata la temperatura esterna fissa al valore di progetto per la città di Torino: -8°C . I valori ottenuti sono: $424 W_t$ per la Sala Controllo, $771 W_t$ per la Sala Studio 1, $796 W_t$ per la Sala Studio 2 e $225 W_t$ per il Locale Tecnico. In questo caso si è deciso di mantenere tramite il sistema di riscaldamento il Locale Tecnico a 15°C , altrimenti i valori di temperatura sarebbero troppo bassi all'interno e si avrebbero perdite anche per la Sala Studio 2 che confina tramite una parete interna. La quota maggiore di potenza termica è associata alle due sale studio, seguita dalla Sala Controllo. Nel caso in cui si volesse impostare la T di setpoint di 20°C anche nel Locale Tecnico, si osserverebbe che le potenze termiche della Sala Controllo sarebbero maggiori, anche se di poco, rispetto a quest'ultimo per la presenza della porta finestra. Inoltre si evidenzia una differenza maggiore di potenze termiche per le due aule rispetto ai risultati del caso estivo a causa del contatto della Sala Studio 2 con il Locale Tecnico: la differenza è di 20W , trascurabile ma comunque da tenere in conto. La potenza termica complessiva è pari a $2216 W_t$.

Temperatura esterna $^{\circ}\text{C}$	Temperatura Sala Controllo $^{\circ}\text{C}$	Temperatura Sala Studio 1 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura Sala Studio 2 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura Locale Tecnico $^{\circ}\text{C}$	Carico sensibile termico Sala Controllo W_t	Carico sensibile termico Sala Studio 1 W_t	Carico sensibile termico Sala Studio 2 W_t	Carico sensibile termico Locale Tecnico W_t	Carico sensibile termico totale W_t
-8	20	20	20	15	424	771	796	225	2216

Tabella 6.6: Risultati calcolo di progetto invernale

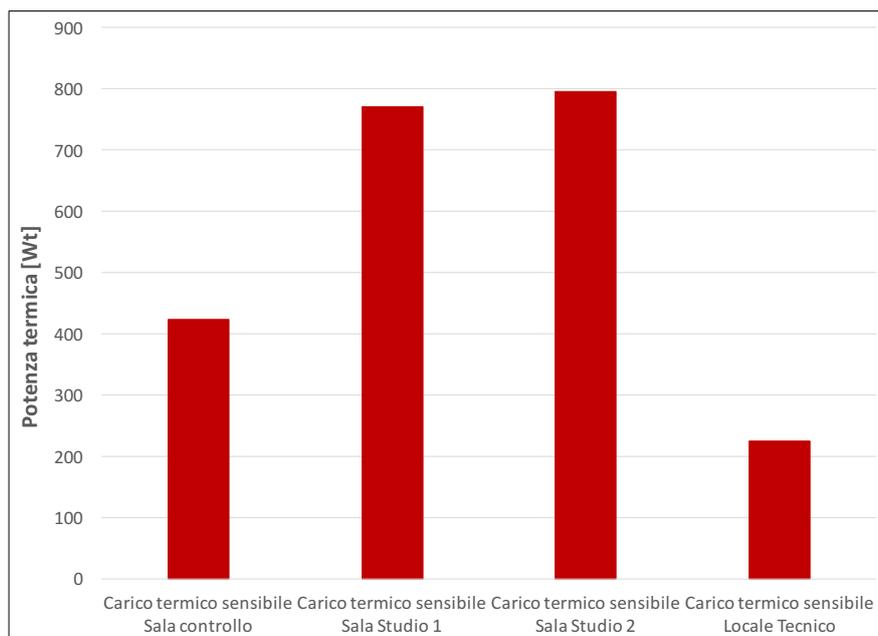


Figura 6.6: Carichi termici sensibili per ogni locale

La simulazione per il giorno di progetto estivo è stata condotta in regime dinamico, tenendo in conto la variazione della temperatura esterna con legge sinusoidale di periodo 24 ore. I carichi interni sono massimi in quanto si è considerata la piena occupazione dei locali, pertanto ci si aspetta che il valore di picco per gli ambienti sia raggiunto quando la temperatura esterna è più alta. Il valore massimi di temperatura si raggiunge alle 15:00 ed è pari a $30,5^{\circ}\text{C}$, infatti per la Sala Controllo il picco si raggiunge alle 16:00 per $799 W_f$ e alle 17:00 per le due sale studio per, rispettivamente, $2389 W_f$ e $2386 W_f$. Il fatto che il picco nelle due aule studio sia raggiunto due ore dopo rispetto alla sala controllo dipende dalla differenza di dimensione che è doppia per le sale studio quindi ci metteranno più tempo a scaldarsi. Inoltre le due sale studio hanno una leggera differenza dovuta al fatto che la Sala Studio 2 è a contatto con il Locale Tecnico che si è scelto di non climatizzare, pertanto ci sarà una quota di calore che andrà verso quest'ultimo, il che rappresenta un vantaggio secondo il carico di raffrescamento. Si è infine deciso di non rappresentare i consumi del Locale Tecnico in quanto sono trascurabili e si è deciso di non applicarvi la climatizzazione estiva. Per dimensionare la pompa di calore si sono sommati ora per ora le potenze frigorifere di ogni zona analizzata per poi trovare il valore massimo pari a $5555,5 W_f$, il cui orario non corrisponde al momento in cui si ha il massimo nelle due Sale Studio (alle 17:00) ma alle 16:00 quando si ha il massimo di potenza frigorifera per la Sala Controllo.

Risultati del calcolo di progetto estivo

Data/ orario	Temperatura esterna °C	Temperatura Sala Controllo °C	Temperatura Sala Studio1 °C	Temperatura Sala Studio 2 °C	Carico frigorifero Sala Controllo Wf	Carico frigorifero Sala Studio 1 Wf	Carico frigorifero Sala Studio 2 Wf	Carico frigorifero totale Wf
01:00	21	26	26	26	55	136	132	323
02:00	20,5	26	26	26	44	105	102	250
03:00	20	26	26	26	35	80	77	192
04:00	20	26	26	26	26	58	56	141
05:00	19,5	26	26	26	19	40	38	97
06:00	20	26	26	26	15	46	44	106
07:00	20	26	26	26	20	157	155	332
08:00	21	26	26	26	30	301	300	631
09:00	23	26	26	26	177	883	882	1492
10:00	25	26	26	26	400	1694	1694	3788
11:00	27	26	26	26	496	1990	1990	4476
12:00	28,5	26	26	26	569	2131	2130	4831
13:00	29,5	26	26	26	633	2199	2198	5031
14:00	30	26	26	26	710	2268	2267	5246
15:00	30,5	26	26	26	775	2315	2313	5405
16:00	30	26	26	26	798	2379	2377	5555
17:00	29	26	26	26	771	2389	2386	5546
18:00	28	26	26	26	692	2140	2137	4969
19:00	27	26	26	26	601	1909	1905	4416
20:00	25,5	26	26	26	189	542	537	1269
21:00	24,5	26	26	26	138	379	374	891
22:00	23,5	26	26	26	107	286	281	675
23:00	22,5	26	26	26	86	222	218	526
24:00	22	26	26	26	69	175	171	415

Tabella 6.7: risultati calcolo di progetto estivo

La prossima immagine (6.7) mostra visivamente l'andamento dei carichi per la Sala Controllo e le due sale studio e delle temperatura esterna. Si nota come i carichi delle due aule gemelle si sovrappongano e come i valori di consumo siano tre volte maggiori rispetto alla Sala Controllo. Grazie alla rappresentazione dell'evoluzione della temperatura esterna è possibile riconoscere dove ci sarà il picco di carico per ogni zona.

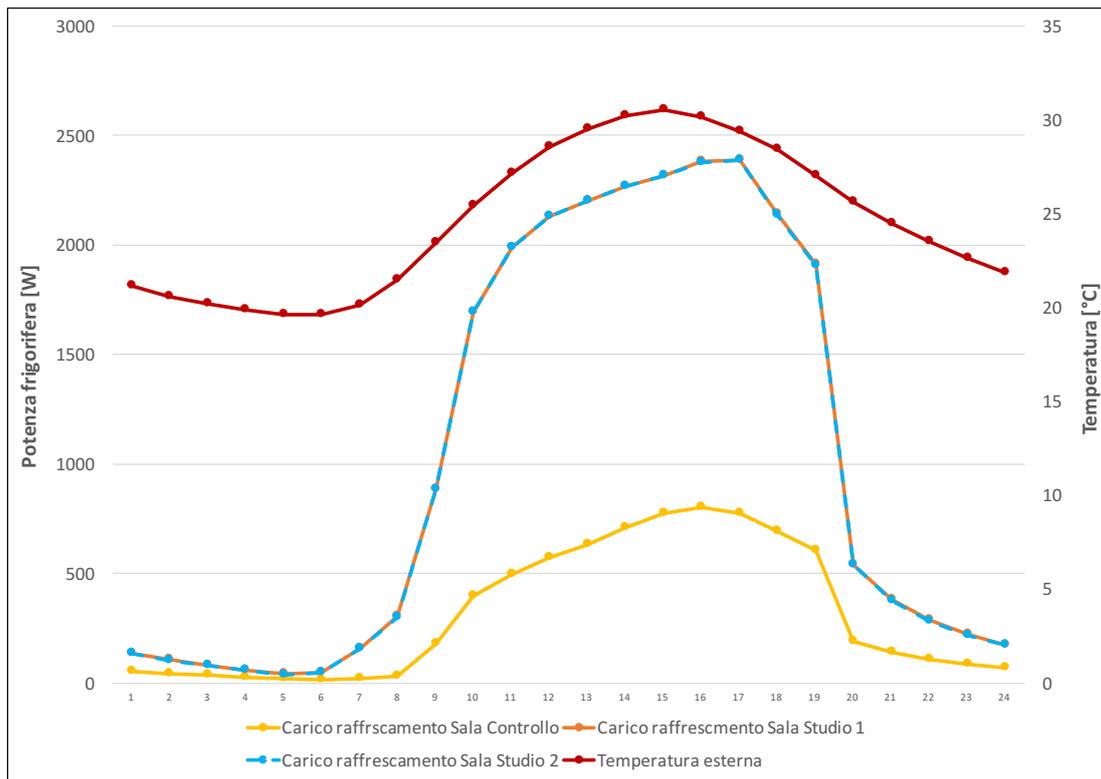


Figura 6.7: Rappresentazione grafica dei carichi per il giorno di progetto estivo

Le potenze frigorifere maggiori sono dovuti al raffrescamento, mentre la quota di riscaldamento è meno della metà, $5,55 kW_f$ contro $2,216 kW_t$. La pompa di calore andrà quindi dimensionata per soddisfare il carico di picco estivo e risulterà sovradimensionata per il raffrescamento. Si riporta l'ultimo grafico che rappresenta la potenza frigorifera totale, somma della potenza frigorifera delle singole aree. Nello stesso grafico si sono rappresentate anche la temperatura esterna e la temperatura all'interno dei locali. Quest'ultima si mantiene sempre sui 26°C di setpoint :

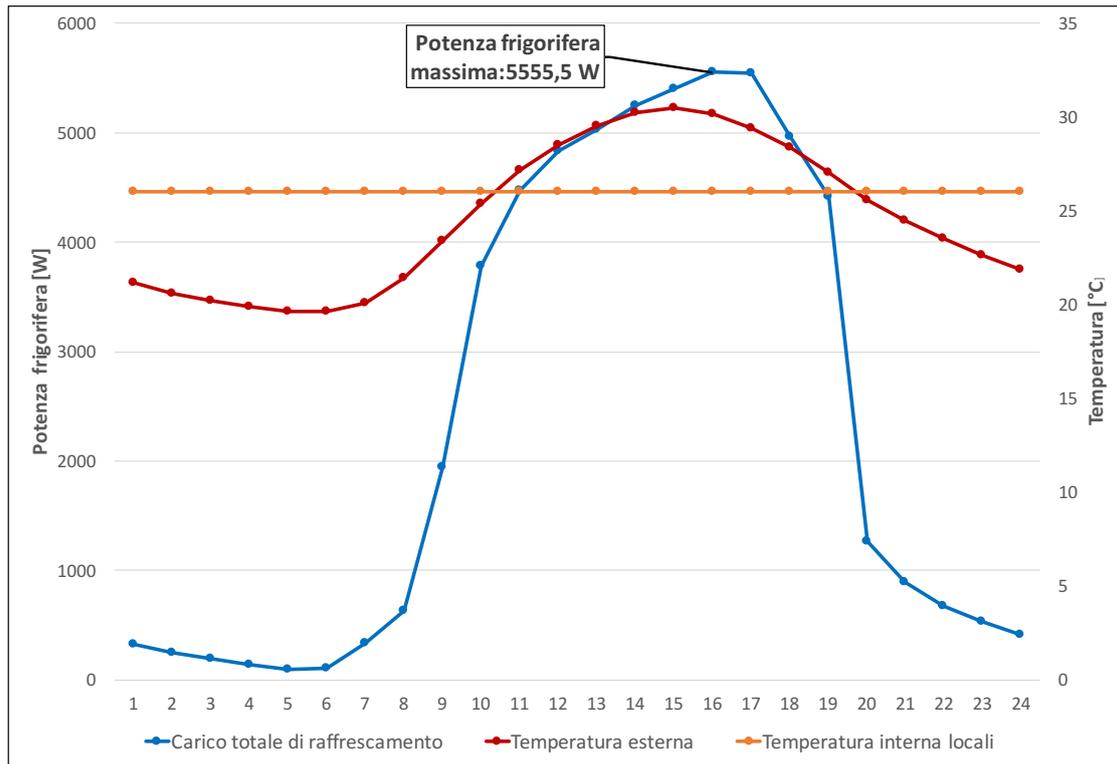


Figura 6.8: Rappresentazione grafica della potenza frigorifera totale

6.3 Analisi dei consumi energetici

L'analisi dei carichi termici per riscaldamento e raffrescamento ha rispecchiato le ipotesi di partenza sull'obiettivo di creare due aule studio gemelle che presentassero uniformità dal punto di vista termo-energetico. Infatti il fabbisogno energetico per il riscaldamento è pari a 605 kWh/anno per la Sala Studio 1 e a 629 kWh/anno per la Sala Studio 2, la differenza è quindi minima e il profilo di carico è pressoché il medesimo. Inoltre, grazie alla nuova stratigrafia studiata in sede di progetto, il carico per riscaldamento è notevolmente ridotto rispetto al caso studio della tesi di Chiara Galleri. I fabbisogni per il riscaldamento della Sala Controllo sono nettamente inferiori, 342 kWh/anno, questo per le dimensioni ridotte del locale, 15,7 m² contro i 35 m² della Sala Studio. Viste le dimensioni inferiori, l'incidenza degli apporti interni è maggiore, inoltre si è considerata l'aula come sempre occupata, a differenza delle Sale Studio per le quali si è creato un profilo di occupazione. Il Locale Tecnico presenta un carico termico ancora inferiore rispetto alla Sala Controllo: 105 kWh/anno. Il locale è infatti sede di inverter e batterie, pertanto come spiegato nel capitolo 4., si è scelto di mantenere la temperatura di 15°C invece che 20°C per l'assenza di persone.

I fabbisogni energetici per il raffrescamento hanno un andamento simile a quelli per il riscaldamento. Per le Sale Studio si hanno rispettivamente 717 kWh/anno e 708 kWh/anno: anche in questo caso il valore è quasi sovrapponibile e l'andamento nel tempo del carico è pressoché il medesimo. Rispetto alla stagione invernale si hanno 100 kWh/anno in più, ma questa differenza viene compensata dai consumi della Sala Controllo e dal Locale Tecnico. Il consumo per la Sala controllo si attesta a 198 kWh/anno, inferiore rispetto al carico invernale, quello per il Locale Tecnico è minimo, 34,15 kWh/anno. L'ultimo valore così basso rispetto agli altri può essere spiegato dall'assenza di carichi interni se non per gli inverter che comunque emettono in totale 71 W. Il fatto che i valori estivi presentino valori simili a quelli invernali dipende anche dal fatto che ad agosto si è optato per un raffrescamento minimo in modo da mantenere un tetto di 35°C per non danneggiare le apparecchiature. Nel caso in cui si fosse considerato l'utilizzo del modulo abitativo anche nel mese di agosto, i valori sarebbero stati maggiori.

	Sala Controllo		Sala Studio 1		Sala Studio 2		Locale Tecnico	
	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo
Fabbisogno termico annuo kWh/y	342	198	605	716	629	708	105	34
Fabbisogno termico annuo specifico kWh/(m²y)	3,01	1,74	5,33	6,30	5,54	6,24	0,93	0,30

Tabella 6.8: Confronto fabbisogni per tutte le zone termiche

E' anche utile avere il valore totale dei kWh/m² all'anno per poterli confrontare con i valori proposti dal *Passivhaus Institute*. Con le ipotesi avanzate sugli apporti interni, con la stratigrafia studiata in modo da avere un basso valore di trasmittanza termica,

si ottengono nella stagione invernale $14,82 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$ che è minore del valore di $15 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$ del *Passivhaus institute*.

	Valore per tutte le zone termiche
Fabbisogno per riscaldamento specifico $\text{kWh}/(m^2 \text{ y})$	14,82
Fabbisogno per raffrescamento specifico $\text{kWh}/(m^2 \text{ y})$	14,59

Tabella 6.9: Fabbisogno specifico totale

Le prossime figure (6.9) e (6.10) mostrano l'andamento del carico termico per raffrescamento e riscaldamento durante tutto l'anno. Si può notare che, salvo sporadiche differenze, i profili si equivalgono come era stato prefissato. Entrambe presentano un picco del sistema di riscaldamento il giorno 8 gennaio, molto probabilmente perché è il primo giorno di accensione dell'impianto ed è necessaria una potenza termica maggiore per arrivare al setpoint di 20°C . La Sala Studio 1 presenta dei valori di picco di poco maggiori tra fine novembre ed inizio dicembre. Si nota che a fine marzo e nella seconda metà di ottobre il carico di riscaldamento è ridotto e in alcuni casi l'impianto è spento, poiché si è raggiunto il setpoint di 20°C senza bisogno della sua attivazione. Durante la stagione estiva si osserva che il valore di picco si raggiunge il 26 di luglio e questo valore è confrontabile con il valore di picco per il carico di riscaldamento.

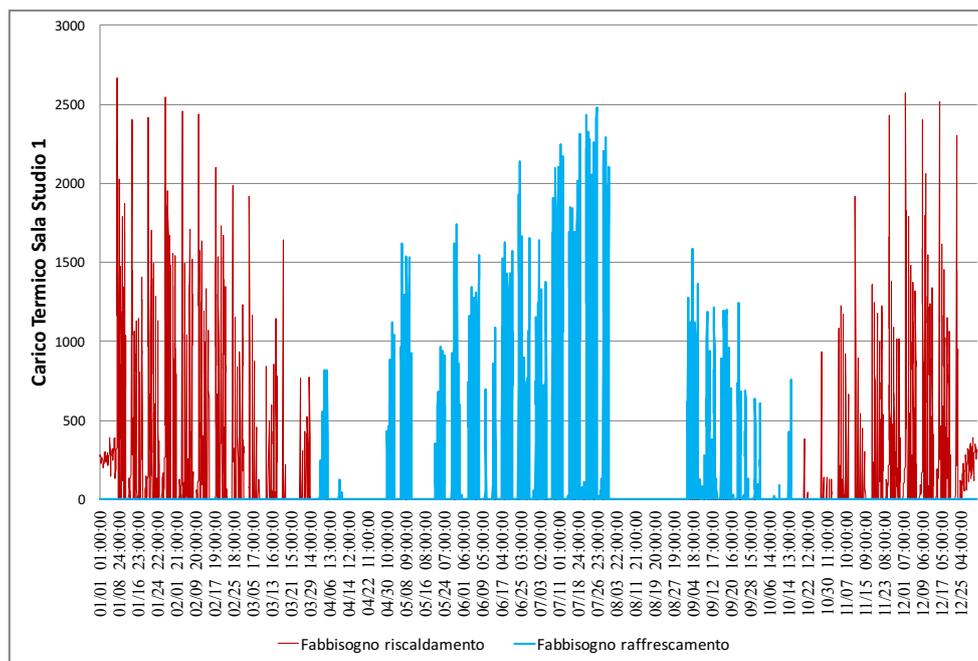


Figura 6.9: Andamento annuo fabbisogni energetici della Sala Studio 1

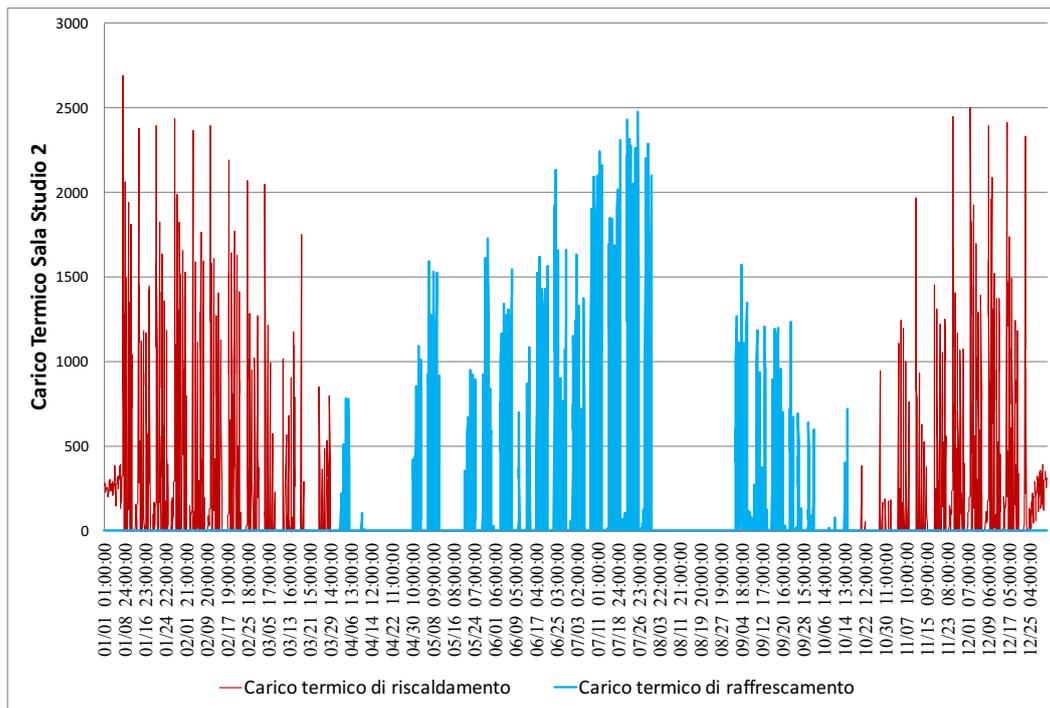


Figura 6.10: Andamento annuo dei fabbisogni energetici della Sala Studio 2

La figura (6.11) mostra i risultati della simulazione per la Sala Controllo. L'andamento annuo è analogo a quello delle due aule studio ma i valori dei carichi sono globalmente minori. Il picco per la stagione di riscaldamento si ha nuovamente l'8 gennaio, mentre per la stagione estiva si ha il 22 luglio: dunque i mesi a cui corrispondono i picchi sono i medesimi. Si nota anche che i carichi estivi sono minori rispetto a quelli invernali.

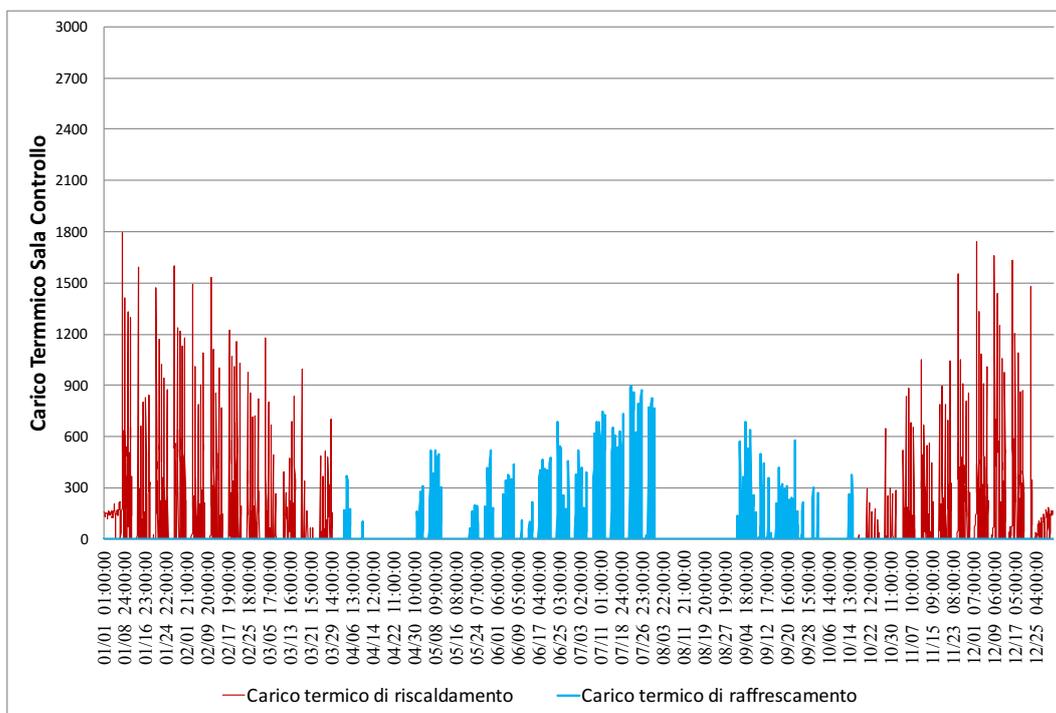


Figura 6.11: Andamento annuo dei fabbisogni energetici della Sala Controllo

Infine si riporta lo stesso tipo di grafico per il Locale Tecnico (6.12). I valori sono nettamente inferiori ai precedenti casi e contribuiscono in piccola parte al bilancio energetico complessivo dell'edificio. Questa soluzione è in linea con le ipotesi scelte, ovvero di non riscaldare il locale a non più di 15 °C d'inverno, mentre non si è posto alcun vincolo per quanto riguarda il raffrescamento poiché i carichi interni sono ridotti al solo inverter e raramente si superano i 26°C di setpoint: i valori più elevati per il raffrescamento si raggiungono nel periodo giugno-luglio.

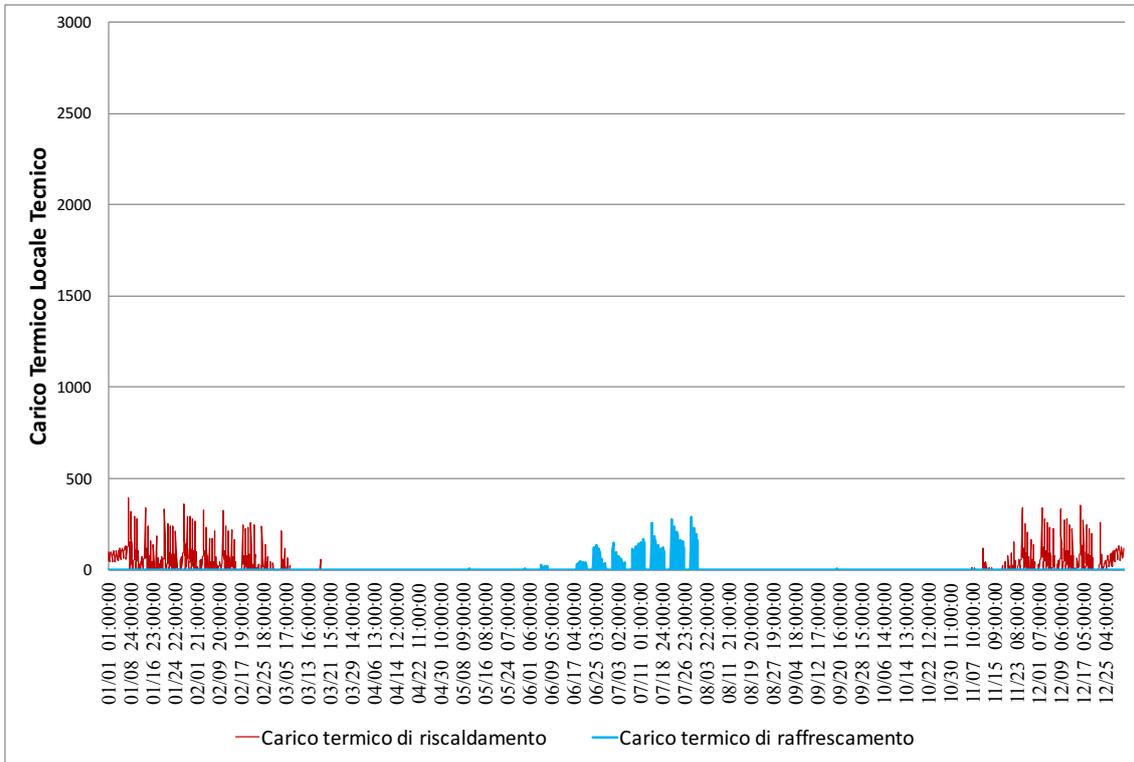


Figura 6.12: Andamento annuo dei fabbisogni energetici del Locale Tecnico

Tra tutti i giorni dell'anno si è scelto di analizzare nel dettaglio l' 8 gennaio e il 26 luglio poiché richiedono rispettivamente il carico più alto per riscaldamento e per raffrescamento. La scelta si è basata sulle due aule studio dal momento che sono le principali fonti di consumo energetico. La temperatura all'orario di apertura del modulo raggiunge il minimo giornaliero pari a $-3,39\text{ }^{\circ}\text{C}$, infatti alle 08:00 corrisponde un picco per tutti i locali per il riscaldamento. Il carico delle aule studio è ovviamente maggiore e quello del Locale Tecnico è praticamente trascurabile sia nel momento di picco sia in tutto l'arco della giornata. Successivamente al carico di picco, i consumi scendono per poi avere un ulteriore incremento alle 11:00: il fenomeno può essere dovuto al fatto che inizialmente il sistema ideale di riscaldamento riesca a tenere i 20°C di setpoint nelle prime 2 ore grazie alla grande quantità di energia fornita all'orario di apertura; in seguito, per mantenere i 20°C interni, è necessario che il sistema eroghi più energia. Anche per la Sala Controllo vale lo stesso ragionamento, ma il secondo picco si ha due ore più tardi per le dimensioni ridotte del locale rispetto alle due sale studio. Inoltre si nota come il minimo dei consumi corrisponda al momento in cui la temperatura esterna raggiunge il suo massimo giornaliero: $1,39^{\circ}\text{C}$ alle ore 14:00. Infine nelle ore pomeridiane fino alle 19:00, il carico termico torna ad aumentare in sintonia con la diminuzione della temperatura esterna, per poi azzerarsi dalle 19:00 in poi, ovvero l'orario di chiusura. L'andamento giornaliero appena descritto è comune a tutti i locali, anche se è più evidente per le sale studio che in questo caso studio sono più energivore:

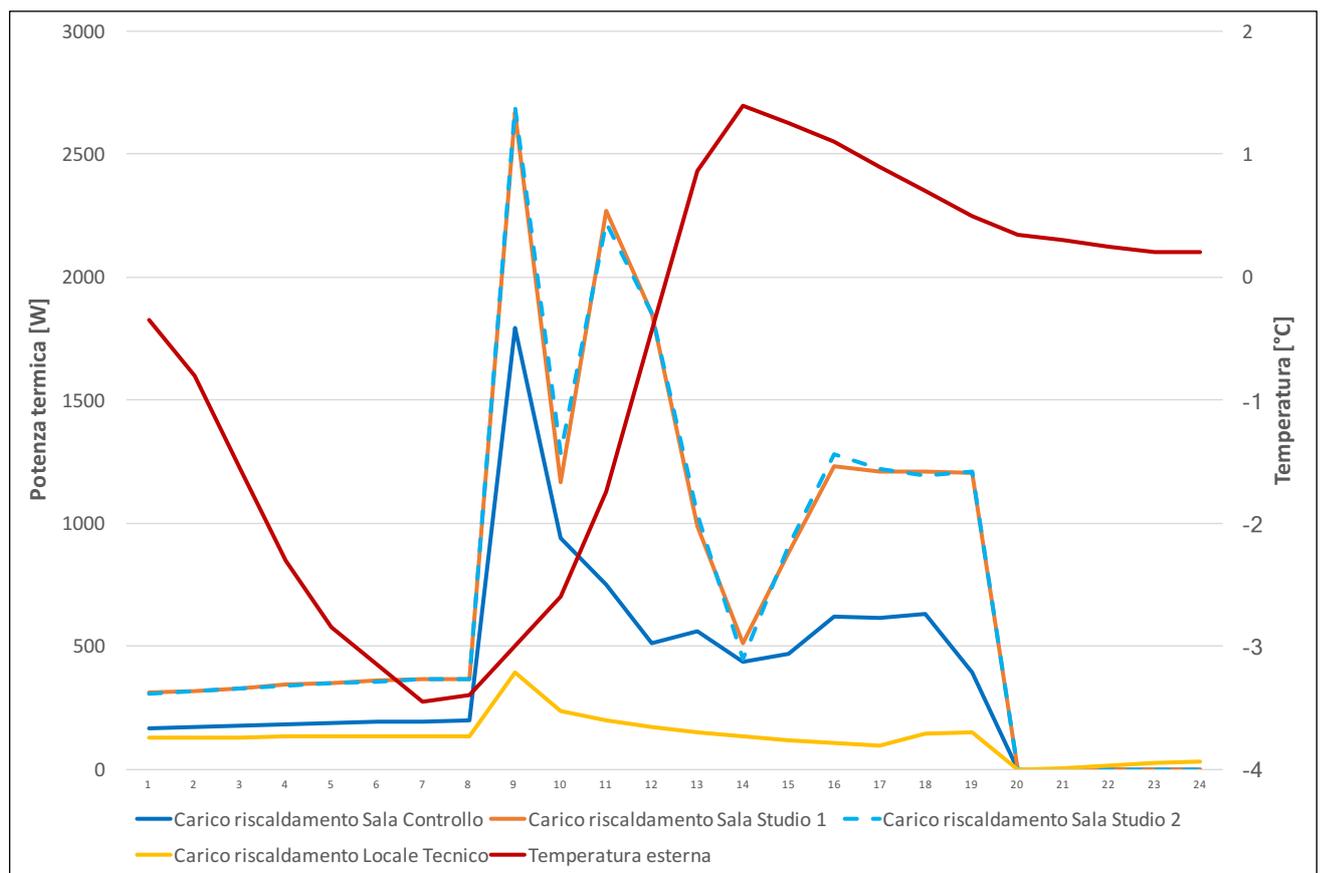


Figura 6.13: Andamento giornaliero dei carichi per l'8 gennaio

Si riporta anche l'andamento delle temperature e delle potenze termiche per i 4 locali. E' utile avere questa visione d'insieme perché si notano diversi aspetti interessanti: In-

nanzi tutto il picco della potenza termica si ha per tutti e 4 i locali alle 08:30 che coincide con l'orario di apertura. Infatti per portare il locale da 13°C ai 20°C in mezz'ora di tempo (l'impianto si accende alle 08:00), è necessaria una notevole potenza. Inoltre si nota che il profilo di potenza delle due aule studio è quasi perfettamente coincidente: entrambi i profili seguono l'andamento della temperatura esterna, infatti quando quest'ultima sale intorno alle 14:00, anche la potenza erogata dall'impianto cala di conseguenza; lo stesso si può dire per la potenza termica richiesta dal Locale Tecnico che presenta il minimo intorno alle 14:00. La temperatura di 20°C di setpoint è sempre mantenuta all'interno delle due sale studio e della Sala Controllo durante il periodo di apertura, per poi tornare ai 13°C imposti durante la chiusura. Si osserva che dopo le 19:00 la temperatura non scende bruscamente a 13°C ma lentamente a causa dell'inerzia termica delle pareti e degli apporti interni. Trattandosi di una giornata caratterizzata da clima rigido, si ottengono potenze elevate nelle ore più fredde del mattino; inoltre si nota che la potenza termica del Locale Tecnico è trascurabile rispetto a quelle degli altri locali.

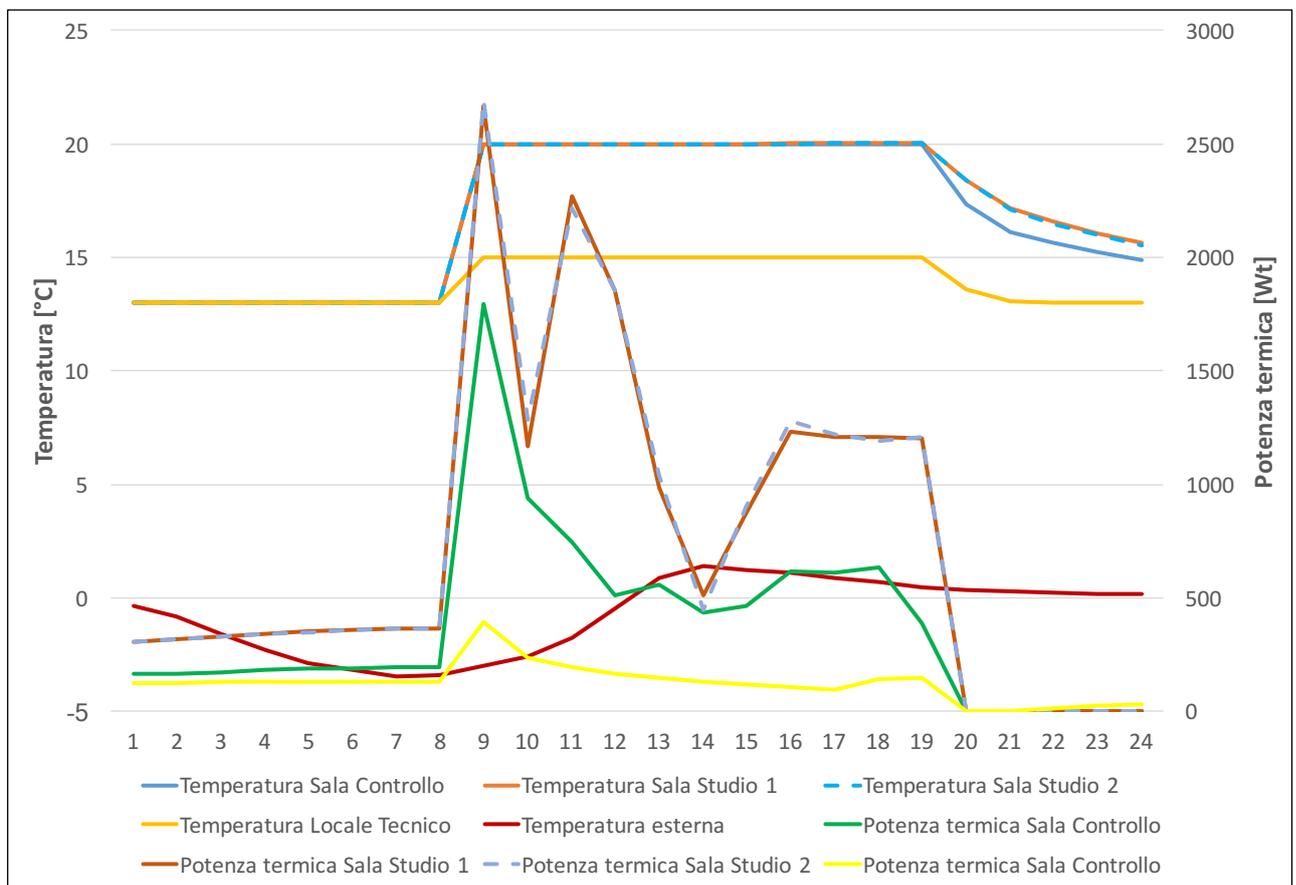


Figura 6.14: Andamento temperature e potenze termiche per tutti i locali per il 6 gennaio

Il prossimo grafico 6.15 mostra l'andamento dei carichi termici per tutte le zone termiche nella settimana che dall'8 al 11 gennaio. Sono 4 giornate invece che 5, poiché si è ipotizzato che le vacanze durassero fino al 7 compreso e nell'anno 2019 il 7 è un lunedì, quindi la settimana in esame va da martedì a venerdì; si sono esclusi i weekend perché non sono rilevanti dal punto di vista energetico. Nel corso della settimana è evidente che i consumi delle due sale studio sono quasi del tutto sovrapponibili come era stato auspicato. Il valore massimo è raggiunto l'8 gennaio e i valori di picco per tutte le zone si raggiungono all'orario di apertura eccetto che per l'ultima giornata che è alle 11:00: questo perché la temperatura raggiunge il suo minimo non prima dell'apertura ma alle 10:00. Il valore minimo si ottiene il terzo giorno alle ore 13:00 in corrispondenza di un picco di temperatura eccezionale di 8°C. Per avere tale temperatura, si deve avere un'elevata irradianza che genera più apporti solari gratuiti. Come per l'andamento giornaliero, il profilo del carico è strettamente dipendente dalla temperatura esterna.

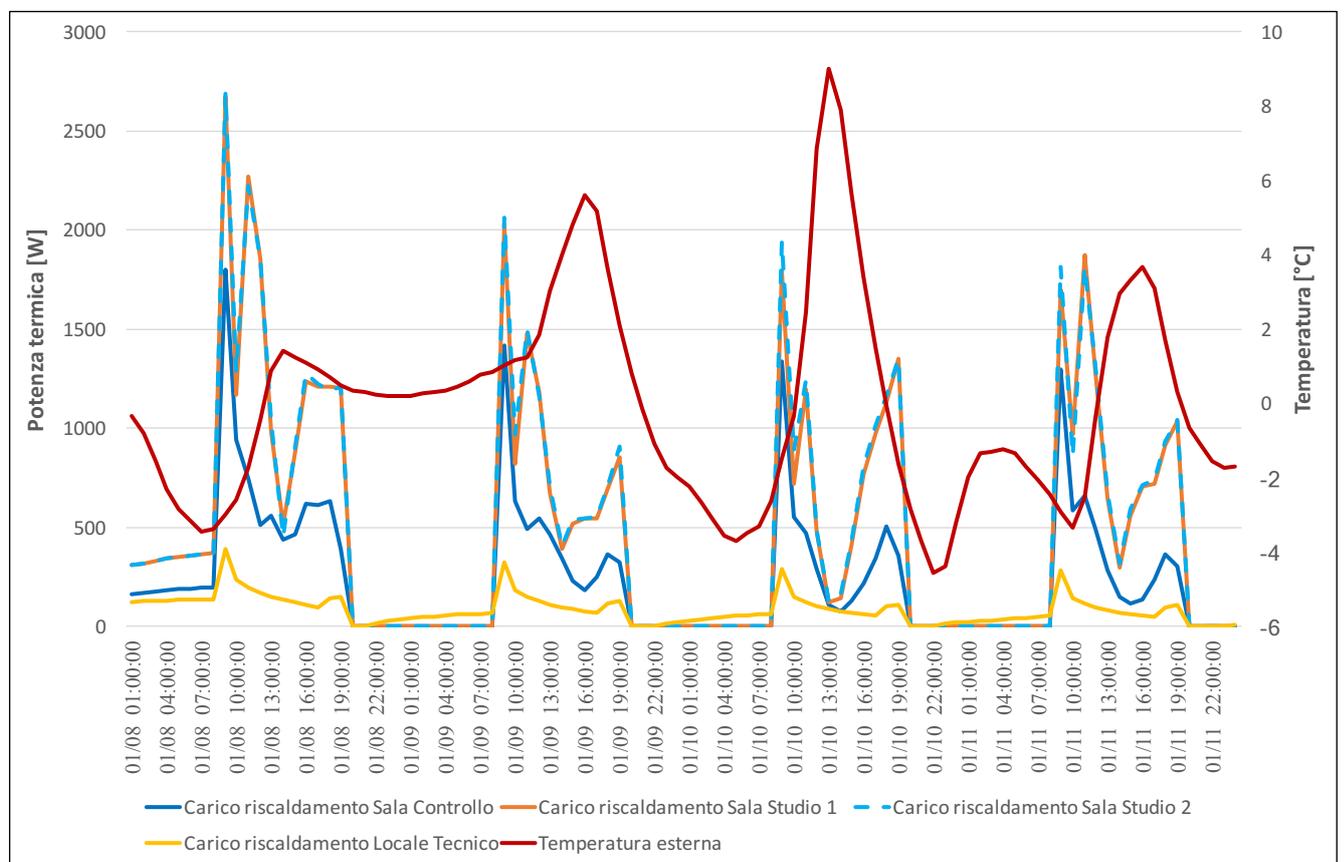


Figura 6.15: Andamento giornaliero dei carichi per i giorni dall'8 all'11 gennaio

L'ultimo grafico per il mese di gennaio mostra l'andamento della temperatura in tutti i locali durante la settimana analizzata precedentemente. Si nota che il setpoint interno stabilito a 20°C è sempre raggiunto e mantenuto per le ore di occupazione del modulo abitativo. Non si notano neanche riscaldamenti eccessivi oltre il setpoint, visto che la temperatura esterna non è così alta da giustificarli.

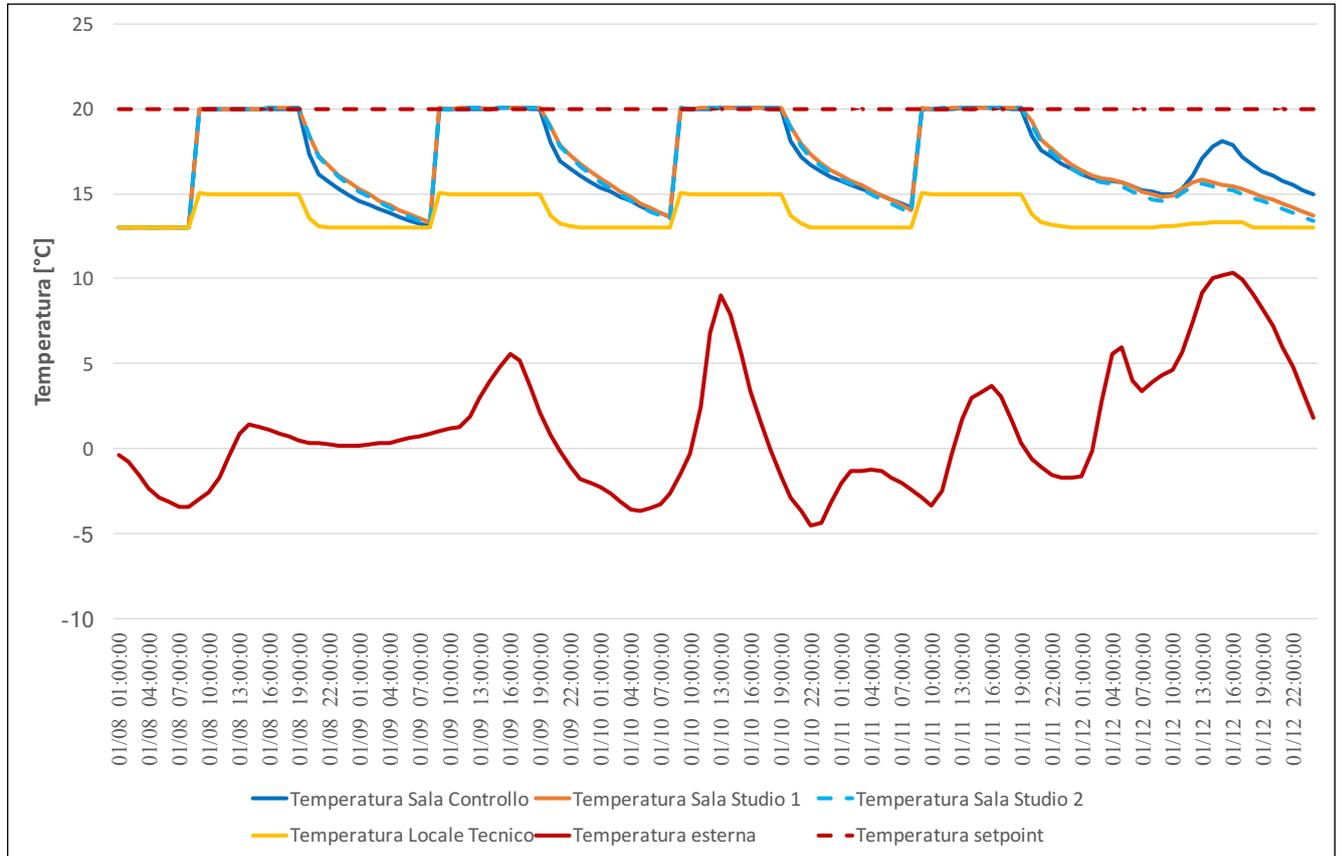


Figura 6.16: Andamento giornaliero delle temperature per i giorni dall'8 all'11 gennaio

E' interessante mostrare l'andamento delle temperature per il mese di marzo. Le temperature esterne in questo mese raggiungono valori tipici primaverili con punte massime anche di 20°C nelle ore centrali della giornata e valori minimi comunque superiori al mese di gennaio. Questo si riflette sulla temperatura interna delle zone termiche: come si è visto nel precedente grafico, la temperatura interna a gennaio si assesta sempre intorno ai 20°C di setpoint, invece a marzo si ottengono valori superiori compresi tra il setpoint invernale e quello estivo di 26°C. La temperatura interna è tanto maggiore, quanto aumenta la temperatura esterna, infatti è evidente che quando quella esterna è bassa, si hanno 20°C all'interno, quando è alta si superano. Con la programmazione dei termostati elencata al paragrafo 4.3.4, anche se si superano i 26°C non avviene il raffrescamento, avendo scelto la modalità *Thermostat Setpoint: Single Heating*. In una situazione non di simulazione ma di reale funzionamento, il sovrariscaldamento verrebbe gestito semplicemente aprendo le finestre; a livello di simulazione oltre alla ventilazione già esistente, è possibile programmare una ventilazione aggiuntiva su Energy Plus che operi solo quando viene superata una certa soglia, per esempio i 26°C. Le temperature esterne più elevate rispetto al caso precedente hanno un effetto diretto anche sui carichi termici. In molte giornate l'impianto di riscaldamento risulta non operativo e questo porta ad un vantaggioso risparmio energetico.

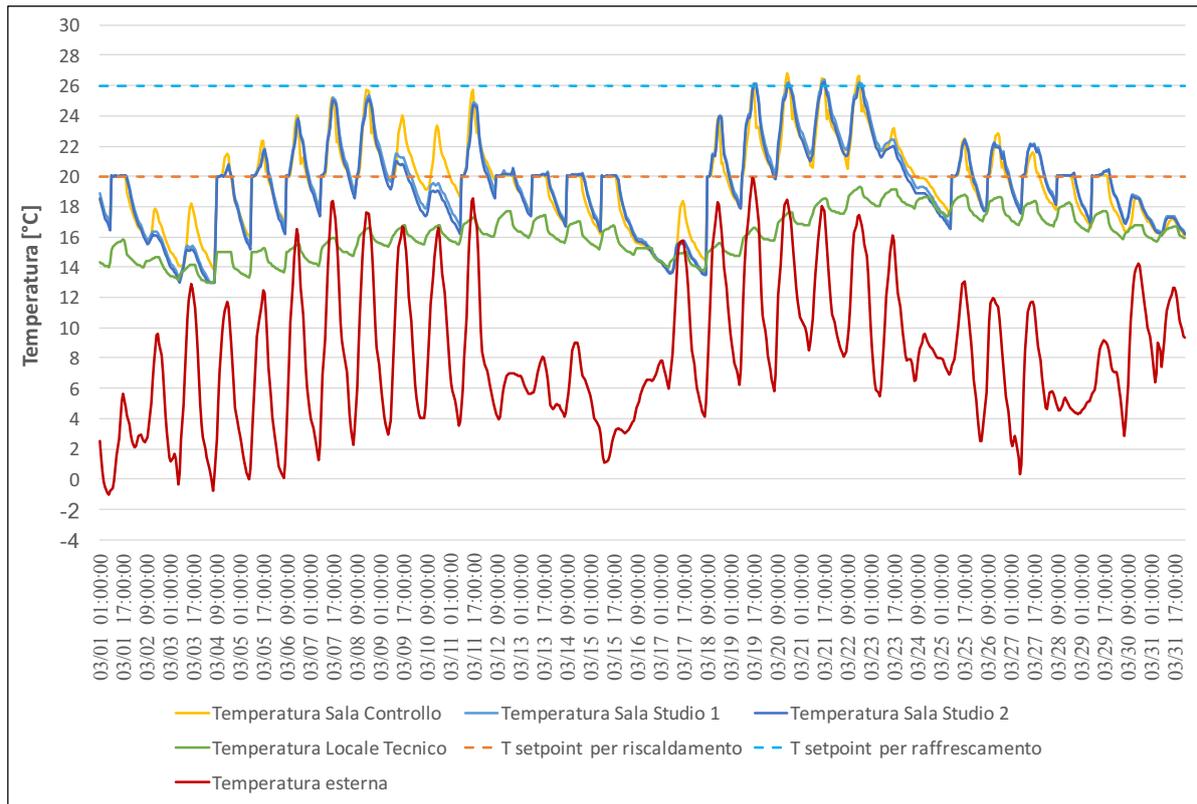


Figura 6.17: Andamento temperature nel mese di marzo

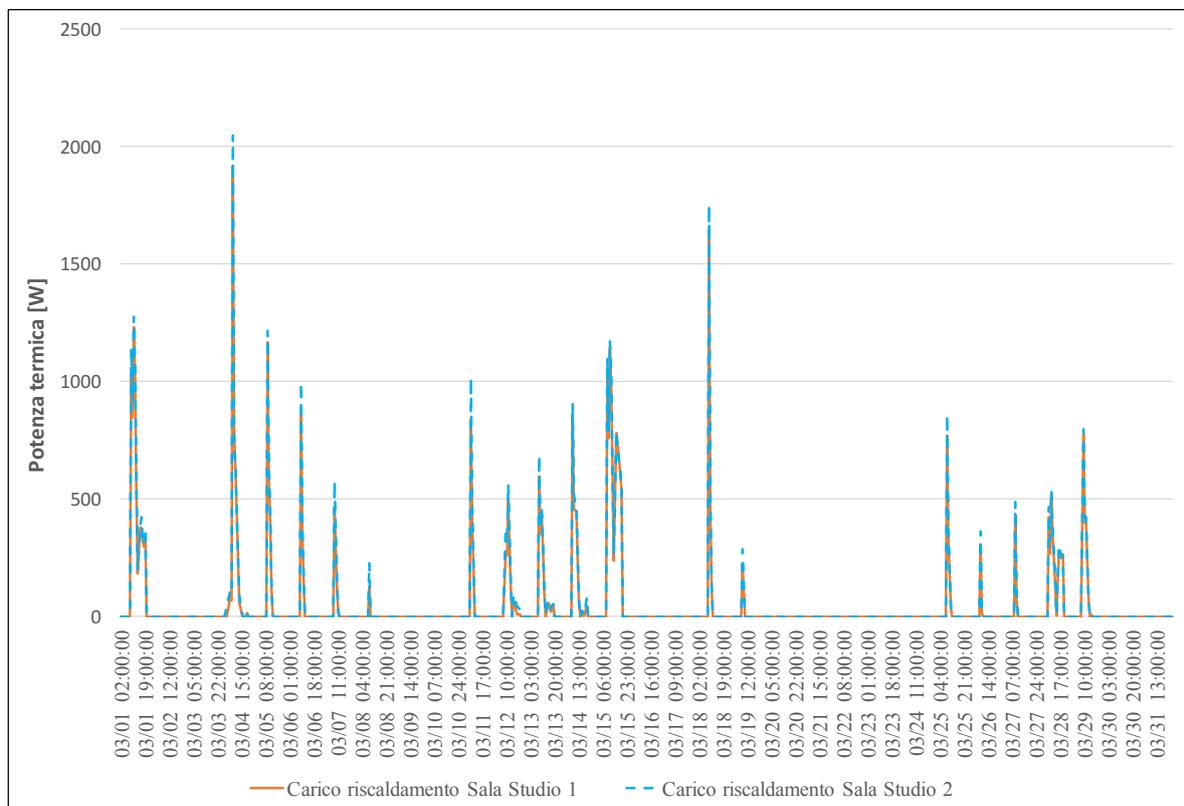


Figura 6.18: Andamento carichi delle due sale studio nel mese di marzo

La prossima immagine (6.19) riguarda l'analisi del giorno 26 luglio, ovvero il giorno in cui si ha il picco del carico termico per raffrescamento; inoltre si riporteranno anche gli andamenti del carico e delle temperatura per tutta la settimana dal 22 al 26 luglio. Dal grafico giornaliero è possibile trarre diverse conclusioni. Innanzitutto si nota subito la sovrapposizione dei carichi per le due aule studio e i valori di picco sono quasi tre volte maggiori del carico di picco per la Sala Controllo, 2479 W contro 864 ma l'orario è il medesimo, le 14:00. I massimi si verificano alle 14:00 per un motivo: a quell'orario si ha sia la massima temperatura esterna, 30,5°C, sia si ha la piena occupazione dell'aula da parte degli studenti fino alle 19:00. Il profilo occupazionale ipotizzato nella schedule delle due sale studio ha un forte impatto sul profilo di carico: i valori sono contenuti fino alle 10:00 quando c'è solo il 50% delle persone, salgono fino alle 12:30 quando c'è piena occupazione, scendono fino a toccare il minimo alle 14:00 (occupazione del 30%) per poi risalire fino all'ora di chiusura. Oltre agli apporti interni causati dalle persone, c'è da considerare la quota di calore dovuta ai computer e alle luci a cui è stato associato un consumo in W/persona. Per la Sala Controllo, invece, siccome si è ipotizzata sempre una piena occupazione, il profilo di carico è sempre in crescita e ha il suo massimo in corrispondenza del massimo della temperatura esterna.

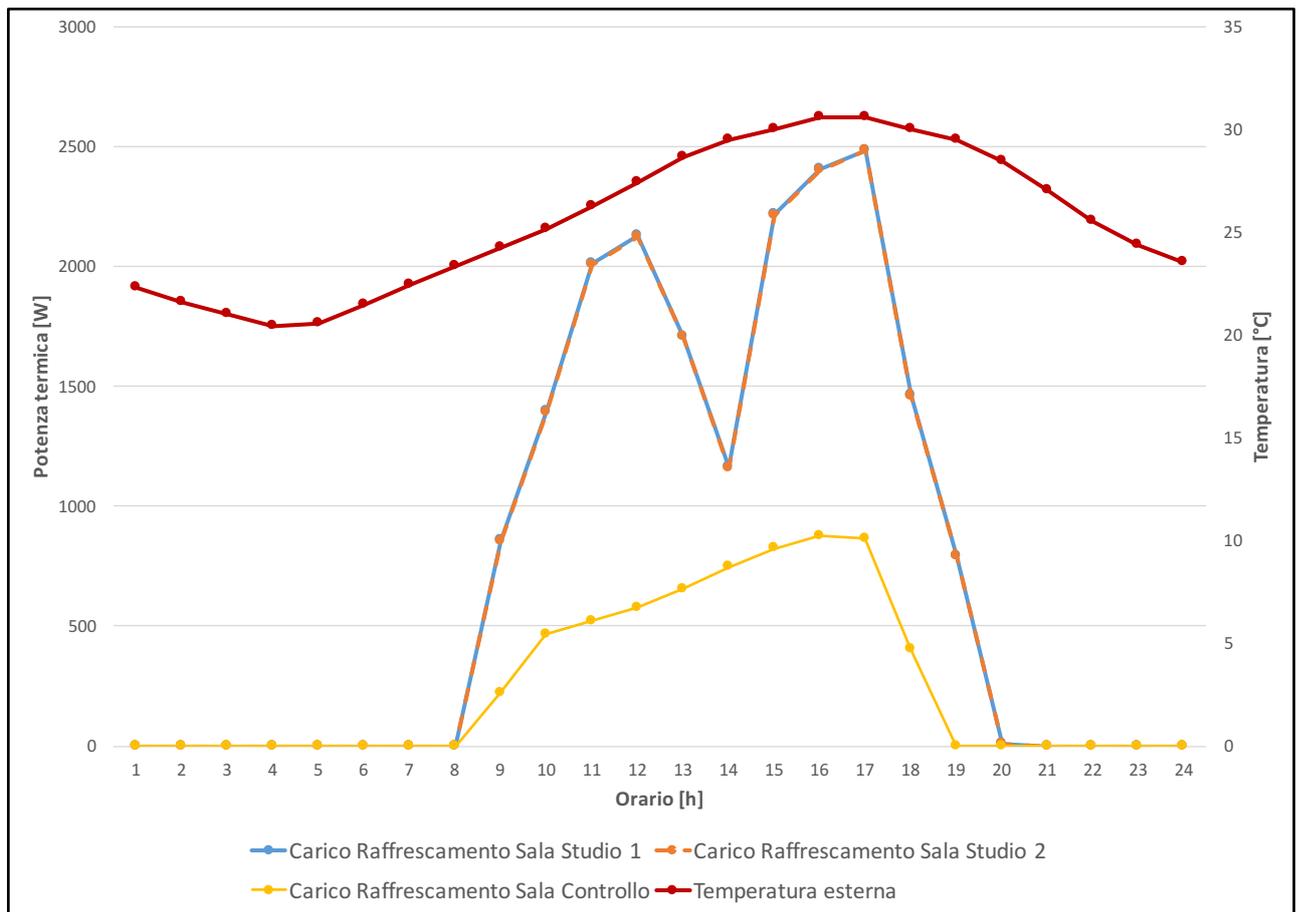


Figura 6.19: Andamento giornaliero dei carichi per il 26 luglio

La prossima immagine (6.20) mostra l'andamento dei carichi e delle temperature durante i giorni dal 22 al 26 luglio; si sono esclusi i weekend perché l'edificio è chiuso al pubblico. Come da aspettativa, i carichi delle sale studio sono nettamente maggiori, tanto che, considerando i valori di picco, sono 3 volte maggiori rispetto alla Sala Controllo e fino a 10 volte rispetto al Locale Tecnico. Per esempio se si considera il 24 luglio, il valore di picco per le sale studio è 2051 W, 623 W per la Sala Controllo e 204 W per il Locale Tecnico. I valori più alti del carico si hanno il 22 e il 26 in corrispondenza della temperatura esterna più alta: questo implica che a parità di apporti interni dati da persone, luci e apparecchiature elettriche, la differenza nel carico è dato dai valori della temperatura esterna. Un altro esempio notevole di quanto appena detto è rappresentato il 24 luglio: alle ore 14:00 si ha un abbassamento improvviso della temperatura a 24°C che corrisponde ad un diretto abbassamento del carico per tutti i locali, per poi risalire l'ora dopo. Il fatto che i valori minimi si raggiungano tra le 12:30 e le 14:00 è dovuto al tasso di occupazione del 30% assegnato per ipotesi.

La temperatura di setpoint a 26°C è sempre assicurata in tutti i locali durante l'orario di apertura 08:30-19:00. Dalle 19:00 in avanti la temperatura torna a salire in accordo con i valori di temperatura esterna: inizialmente si ha un picco di 30°C appena il sistema di condizionamento è spento e poi la temperatura si abbassa gradualmente. Si osserva che le temperature delle due aule studio hanno andamento identico e il decremento della temperatura è minore a causa dell'inerzia termica maggiore delle due Sale Studio.

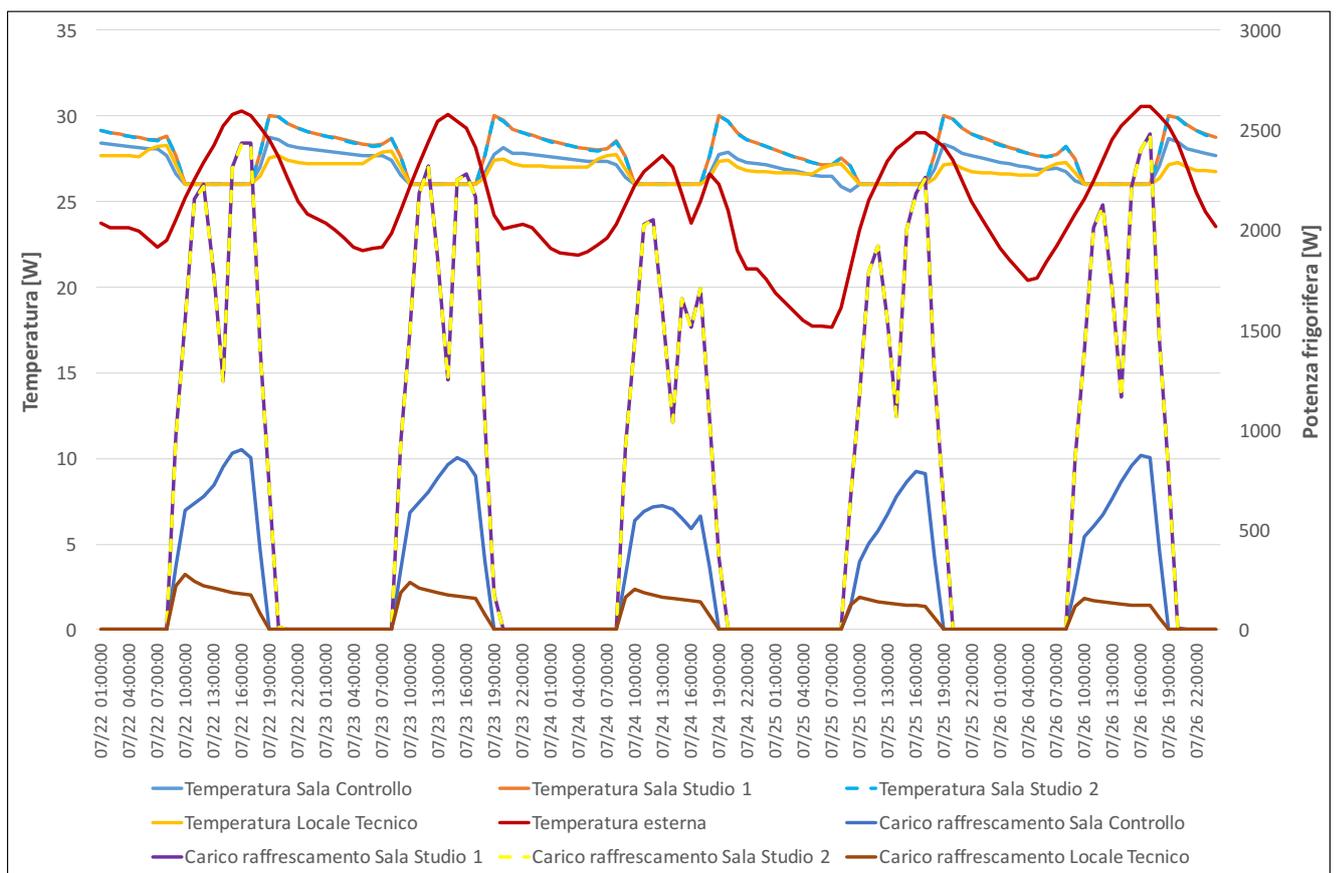


Figura 6.20: Andamento giornaliero dei carichi e delle temperature per i giorni dal 22 al 27 luglio

L'ultima analisi che si è condotta riguarda l'energia termica mensile per ogni zona termica, dividendo tra riscaldamento e raffrescamento. Il mese che richiede più energia per riscaldamento è gennaio, seguito da dicembre. Valgono per questi mesi le stesse considerazioni fatte in precedenza: le aule studio rappresentano la quota più energivora e hanno consumi quasi simmetrici, quasi perché l'aula studio 2 richiede più energia per essere scaldata. Questo fatto è spiegato dal fatto che la Sala Studio è a contatto con il locale tecnico che non è scaldato in inverno, quindi ci saranno più dispersioni di calore verso quest'ultimo che devono essere compensati tramite l'impianto di riscaldamento. Viceversa in estate, quando il locale tecnico si trova a temperatura minore rispetto alla sala studio 2 e quindi il calore viene disperso verso il locale tecnico, il che è un guadagno, benché non eccezionale. Sia i numeri sia il grafico confermano questa teoria. Si può anche notare come il carico per riscaldamento sia molto ridotto nel mese di marzo e minimale nella seconda metà di ottobre, quando le temperature non sono ancora così basse da giustificare l'intervento dell'impianto.

Nella stagione estiva si osserva un forte squilibrio per il raffrescamento: la gran parte dell'energia è richiesta per luglio che rispetto al mese precedente richiede più del doppio per le sale studio, 322 kWh contro 144 kWh. I mesi di aprile e ottobre sono quelli che per cui l'energia richiesta è inferiore tanto da essere quasi trascurabile. Ottobre si presenta come il mese con il consumo inferiore tra tutti sia per riscaldamento sia per raffrescamento.

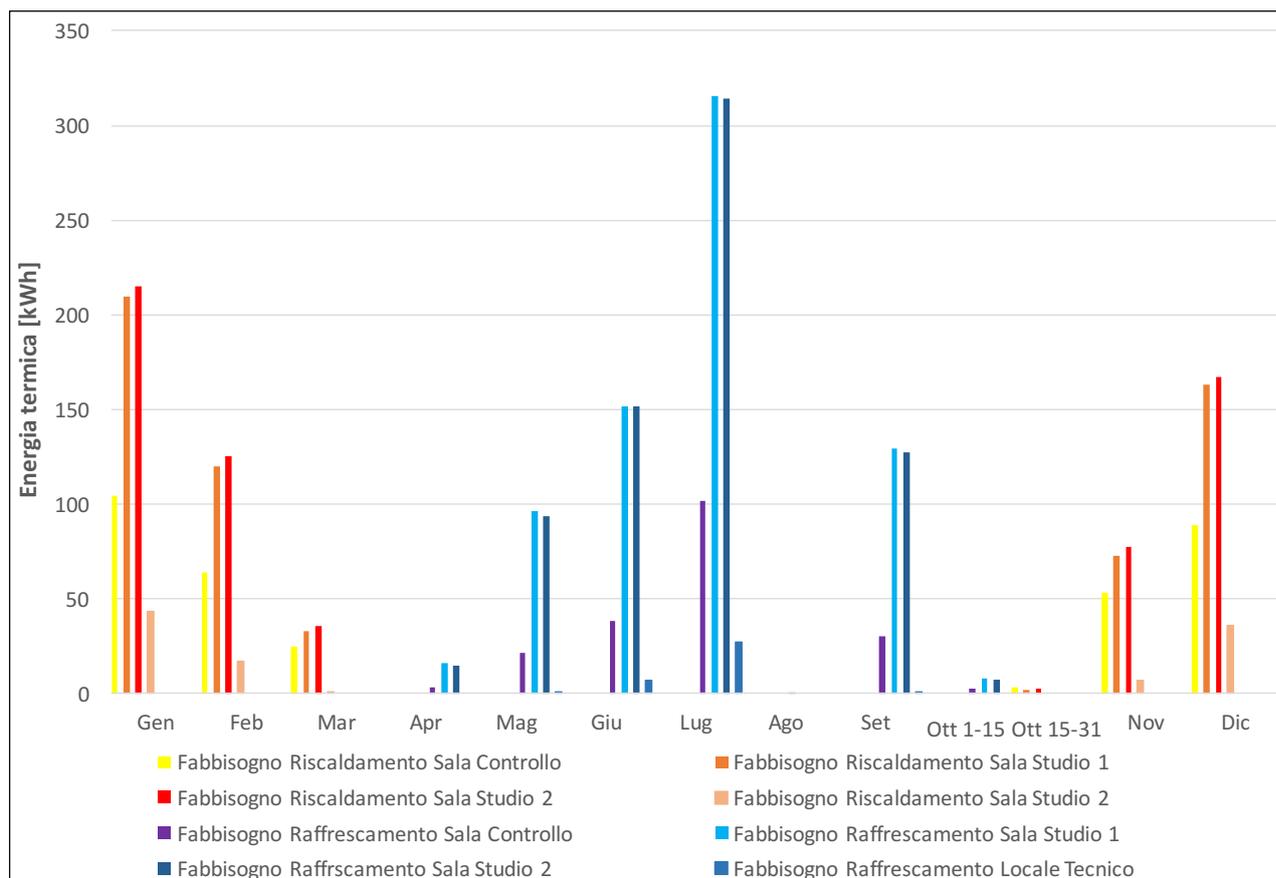


Figura 6.21: Energia termica per riscaldamento e raffrescamento

Energia termica mensile kWh					
	Mesi	Sala Controllo	Sala Studio 1	Sala Studio 2	Locale Tecnico
Riscaldamento	Gen	104,80	210,36	215,85	43,71
	Feb	63,05	117,83	123,37	17,91
	Mar	28,78	39,19	42,87	1,08
Raffrescamento	Apr	2,63	11,78	10,60	0,00
	Mag	22,22	100,07	97,57	0,05
	Giu	36,04	144,39	144,26	5,46
	Lug	103,86	322,78	321,66	28,63
	Ago	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sett	30,80	128,91	127,15	0,01
	Ott 1-16	2,48	8,32	7,64	0,00
Riscaldamento	Ott 15-31	2,92	1,95	2,12	0,00
	Nov	53,33	71,49	76,32	6,81
	Dic	89,16	164,37	169,11	36,34

Tabella 6.10: Consumi mensili zone termiche

Capitolo 7

Analisi dei carichi elettrici e calcolo delle quote di Autoconsumo e Autosufficienza

In questo capitolo si analizzano i consumi elettrici di ogni locale e li si confronta con la produzione di energia elettrica prodotta dai generatore fotovoltaico.

7.1 Analisi dei consumi elettrici

Dalla simulazione di Energy Plus si sono ricavati direttamente in output i consumi derivanti dalle apparecchiature elettroniche, ovvero computer e proiettori, e dal sistema di illuminazione della Sala Controllo e delle due aule studio gemelle. Il locale tecnico, essendo sede di inverter e batterie non ha consumi ad esso associati eccetto che per l'illuminazione dalle plafoniere, quindi non sarà analizzato nel dettaglio come gli altri ambienti.

Oltre ai consumi appena elencati, bisogna calcolare i consumi derivanti dalla ventilazione e dalla pompa di calore. Per quanto riguarda la ventilazione, nella simulazione si era assunta come naturale poiché un reale sistema di ventilazione non è stato ancora progettato. Tuttavia è necessario assegnare un valore in kWh per tenere in conto i consumi elettrici dell'ipotetica ventilazione meccanica. Il D.M. del 26 giugno 2015 assegna un valore in consumo specifico, Wh/m^3 , per ogni m^3 di aria movimentata. Per questa simulazione si è scelto il coefficiente pari a $0,25 \text{ Wh}/m^3$ che considera una ventilazione meccanica a semplice frutto per estrazione:

Tipologia di impianto	E_{ve} [Wh/m ³]
Ventilazione meccanica a semplice flusso per estrazione	0,25
Ventilazione meccanica a semplice flusso per immissione con filtrazione	0,30
Ventilazione meccanica a doppio flusso senza recupero	0,35
Ventilazione meccanica a doppio flusso con recupero	0,50
UTA: rispetto dei regolamenti di settore emanati dalla Commissione Europea in attuazione delle direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, assumendo la portata e la prevalenza dell'edificio reale.	

Figura 7.1: Fabbisogno di energia elettrica specifico per m^3 di aria movimentata

Il riscaldamento e raffrescamento delle zone è affidato ad una pompa di calore aria-acqua. Per valutare i consumi elettrici della pompa di calore si sono considerati per ogni zona i rispettivi carichi termici e li si è divisi per il COP della pompa di calore. Si è ipotizzato che il COP fosse pari a 3 per la stagione invernale e 3,5 per quella estiva. Tuttavia è un'ipotesi, in quanto la scelta della pompa di calore verrà effettuata in seguito.

Visti i ridotti carichi termici sia per riscaldamento sia per raffrescamento, ci si aspetta che la quota maggiore di energia elettrica sia dovuta alle apparecchiature elettroniche, in particolare a causa dei computer per cui si è ipotizzato un consumo costante di 90 W/persona. Nel caso della Sala Studio 1 la quota di consumi maggiore è appunto da attribuire ai computer, il 63 %, a cui segue la pompa di calore con il 15 %. Grazie alla nuova stratigrafia, si sono ridotti i consumi della pompa di calore rispetto al caso studio della tesi di Chiara Galleri. Le luci pesano per un 10 % sul totale, ma questa quota potrebbe essere ridotta in presenza di una simulazione più dettagliata che tenga in considerazione il funzionamento delle luci in relazione alla luce proveniente dalle finestre. Il seguente grafico a torta (7.2) mostra le percentuali e i valori in kWh dei consumi per ogni componente, considerando che il consumo totale è pari a 2754 kWh/anno:

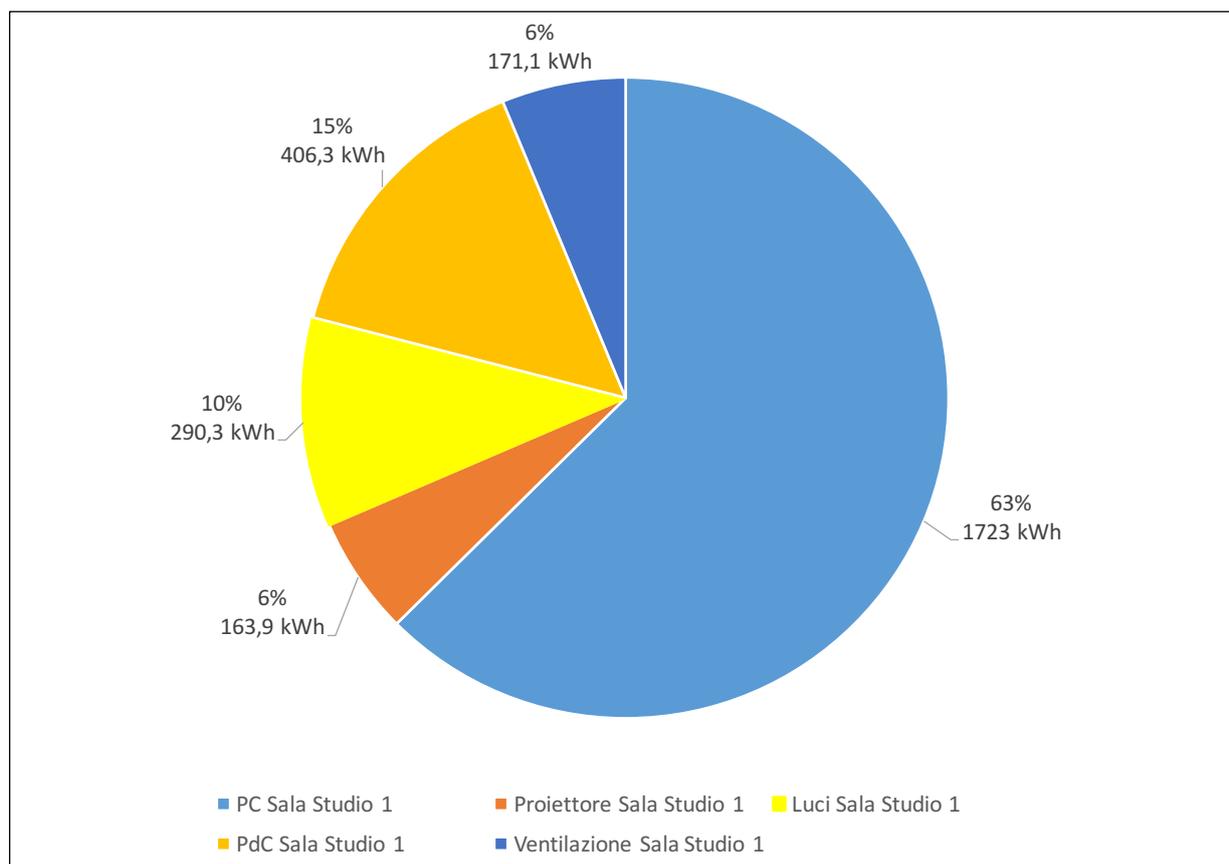


Figura 7.2: Consumi elettrici annuali per la Sala Studio 1

Lo stesso calcolo si è effettuato modificando il profilo di potenza elettrica dei computer. Si è considerato che all'accensione il computer consumi 50 W e poi 35 W durante il normale utilizzo. Nella creazione del profilo si è tenuto in considerazione sia questo aspetto sia il profilo occupazionale dell'aula studio per avere i W totali consumati durante l'intera giornata. Di seguito si riporta il profilo ipotizzato:

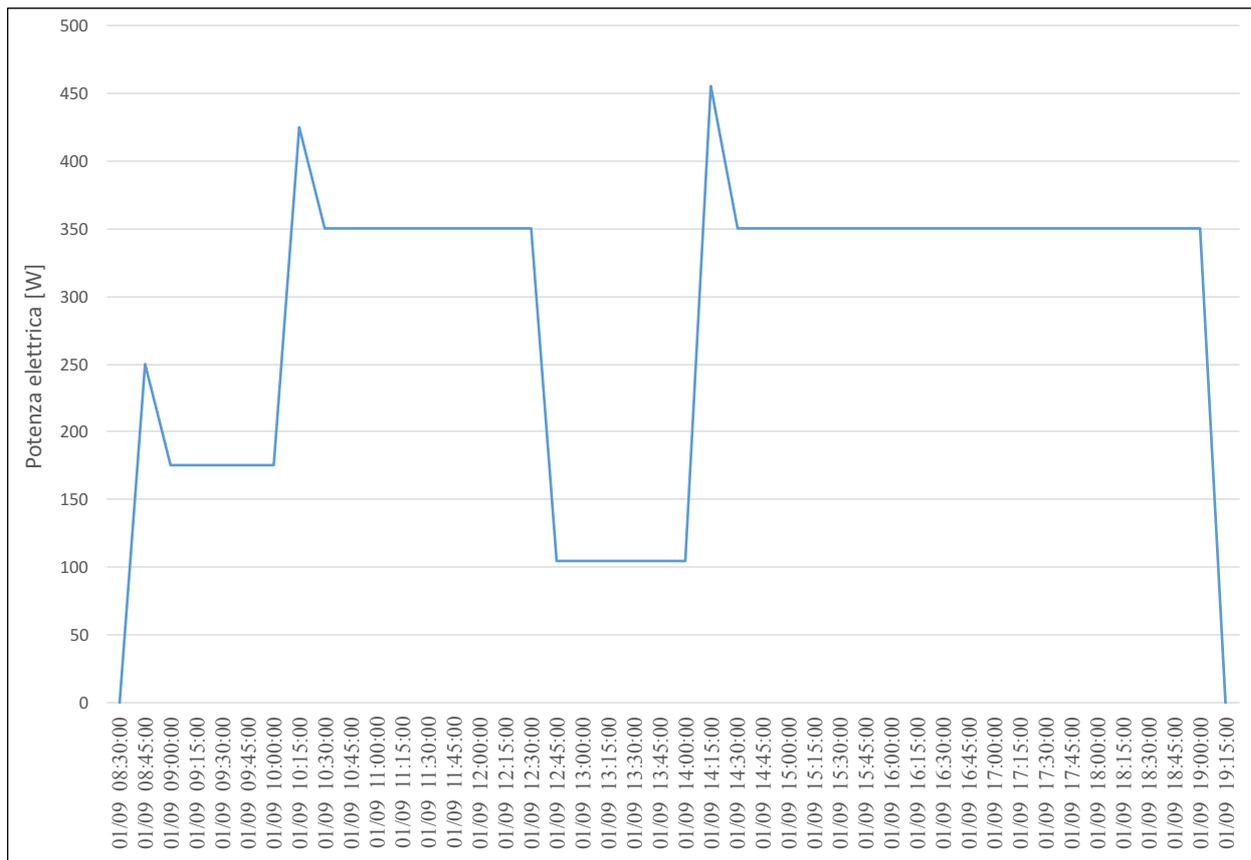


Figura 7.3: Profilo giornaliero dei PC per la Sala Studio 1

Il seguente grafico a torta mostra i risultati ottenuti con il nuovo profilo. Si nota che si ha una netta diminuzione dei consumi elettrici globali dell'edificio: si passa dai 2754 kWh/anno del primo caso ai 1618 kWh/anno per una riduzione del 41 %. La riduzione maggiore si ha per i computer, come ci si aspettava, mentre i consumi della pompa di calore sono i medesimi: una riduzione della potenza dei computer comporta un maggiore carico termico per riscaldamento, ma viceversa per il raffrescamento è minore. Mentre nel primo caso i consumi per i due fabbisogni sono pressoché identici, ora si ha uno squilibrio tra i due carichi. Anche la ventilazione è nettamente inferiore poiché c'è meno calore da asportare.

	Profilo 90 W/persona	Profilo utilizzo ipotizzato
Carico per riscaldamento kWh/anno	201	289
Carico per riscaldamento kWh/anno	204	119
Carico Totale kWh/anno	405	401

Tabella 7.1: Confronto energia elettrica pompa di calore

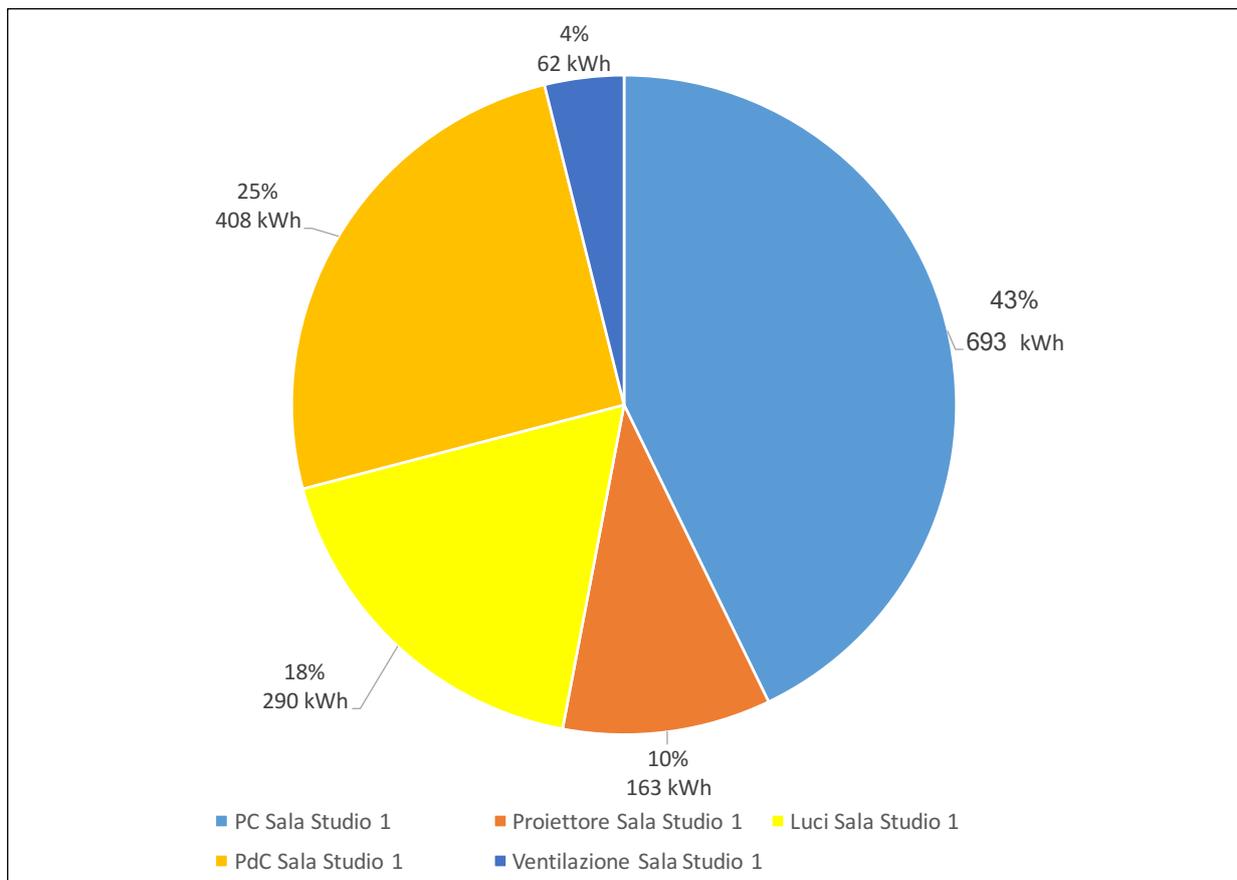


Figura 7.4: Consumi elettrici annuali per la Sala Studio 1 con diverso profilo computer

Ci si aspetta che i valori dei consumi elettrici per la Sala Studio 2 siano pressoché identici a quelli della Sala Studio 1. Si hanno delle leggere variazioni per quanto riguarda la pompa di calore: questa differenza è dovuta al contatto della Sala Studio 2 con il Locale Tecnico che non è condizionato. Infatti se si calcolano singolarmente i consumi della pompa di calore per il riscaldamento ed il raffreddamento si ottiene che in inverno il consumo dell'aula in esame sono 209 kWh/anno contro i 201 kWh/anno della Sala Studio 1 e in estate rispettivamente 202 kWh/anno contro 204 kWh/anno. Come è evidente, la differenza in inverno è leggermente più marcata e questo determina la differenza nei consumi della pompa di calore. Utilizzando come profilo di consumo per i computer i 90W/persona ipotizzati, si ottiene come nel primo caso che la quota maggiore di consumo è associata ad essi, a cui segue la pompa di calore.

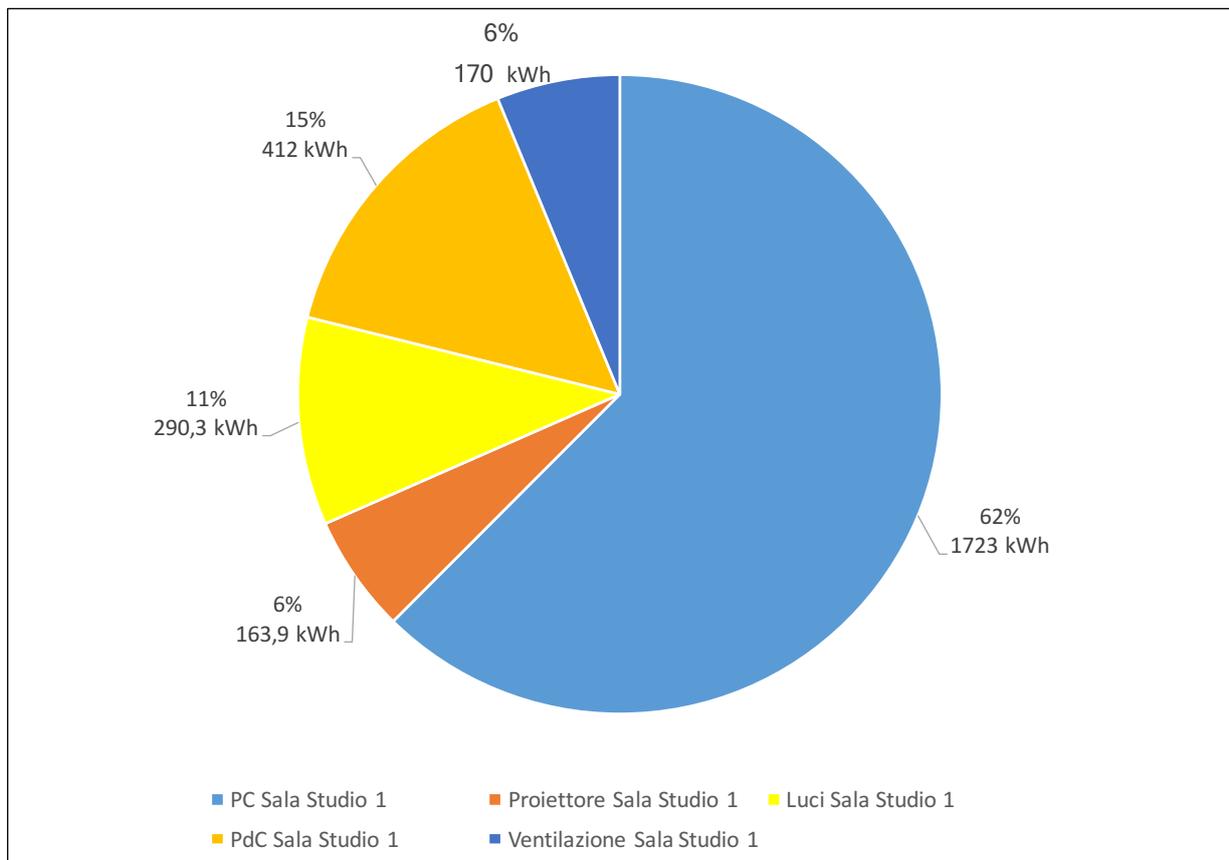


Figura 7.5: Consumi elettrici annuali per la Sala Studio 2

Anche per la Sala Controllo la quota maggiore di consumo di energia elettrica è associata ai computer. A seguire è la pompa di calore con 171 kWh/anno e il consumo minore è associato alla ventilazione anche per questo locale. A differenza delle due aule studio, non è presente un proiettore.

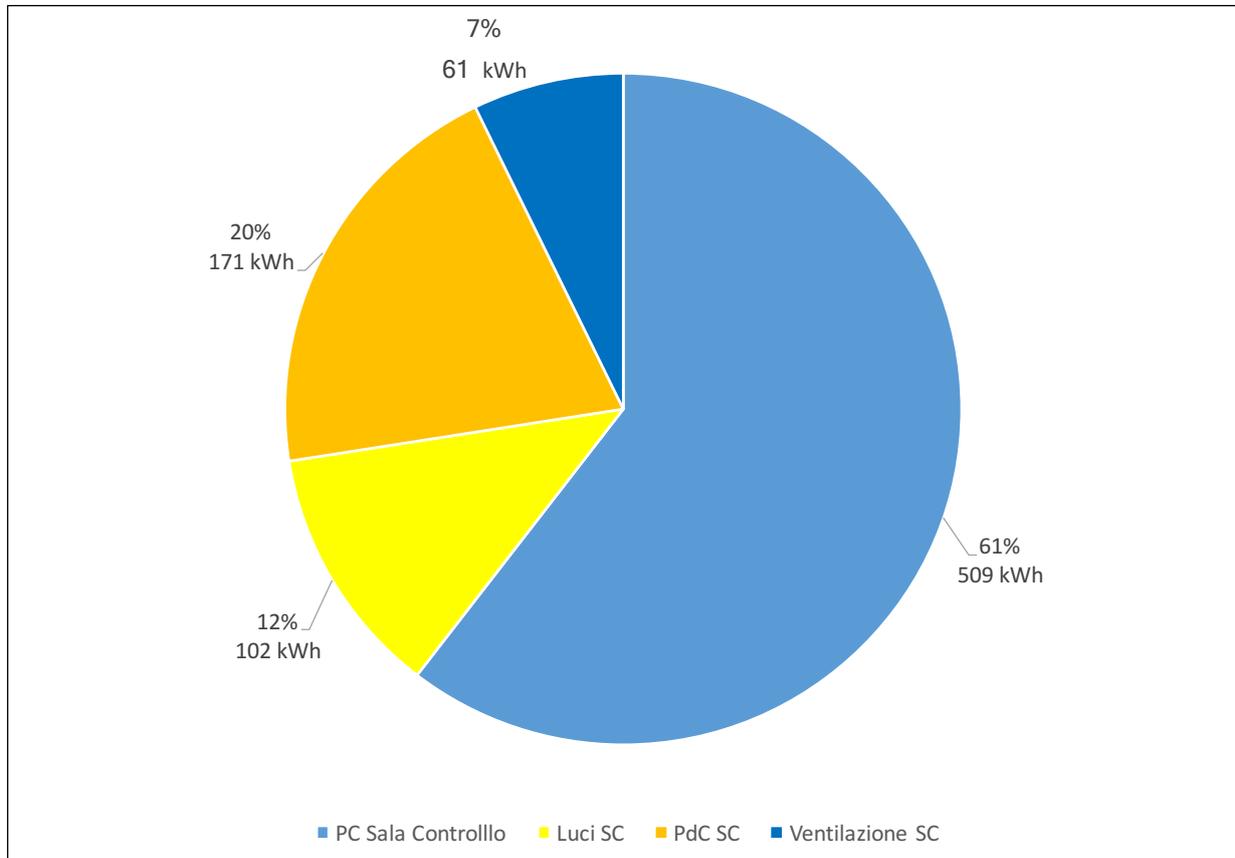


Figura 7.6: Consumi elettrici annuali per la Sala Controllo

Il grafico ad istogrammi che segue (7.7) mostra i consumi elettrici per ogni mese per ogni locale. Come nei risultati dell'analisi termo-energetica, le due sale studio costituiscono la quota di consumo maggiore tanto da essere anche più del doppio rispetto alla Sala Controllo. Siccome i consumi per quanto riguarda luci, proiettori e computer è costante per tutto l'anno, la differenza tra i vari mesi è data dai consumi associati alla ventilazione e alla pompa di calore. Si può infatti notare che da gennaio fino ad aprile si ha un costante decremento dei consumi perché diminuisce il carico per il riscaldamento; da maggio si ha un nuovo incremento dei consumi associati al raffrescamento. Il picco dei consumi si raggiunge a luglio, quando la temperatura esterna è più elevata, perciò i consumi per ventilazione e raffrescamento sono maggiori. Da settembre fino a dicembre si ha un decremento dei consumi: ci si aspetterebbe valori nel mese di dicembre maggiori rispetto a novembre e ottobre, questo perché si sono considerate le vacanze invernali dal 23 dicembre, quindi il modulo abitativo è chiuso e i consumi dipendono solo dalla pompa di calore per mantenere i 15°C interni.

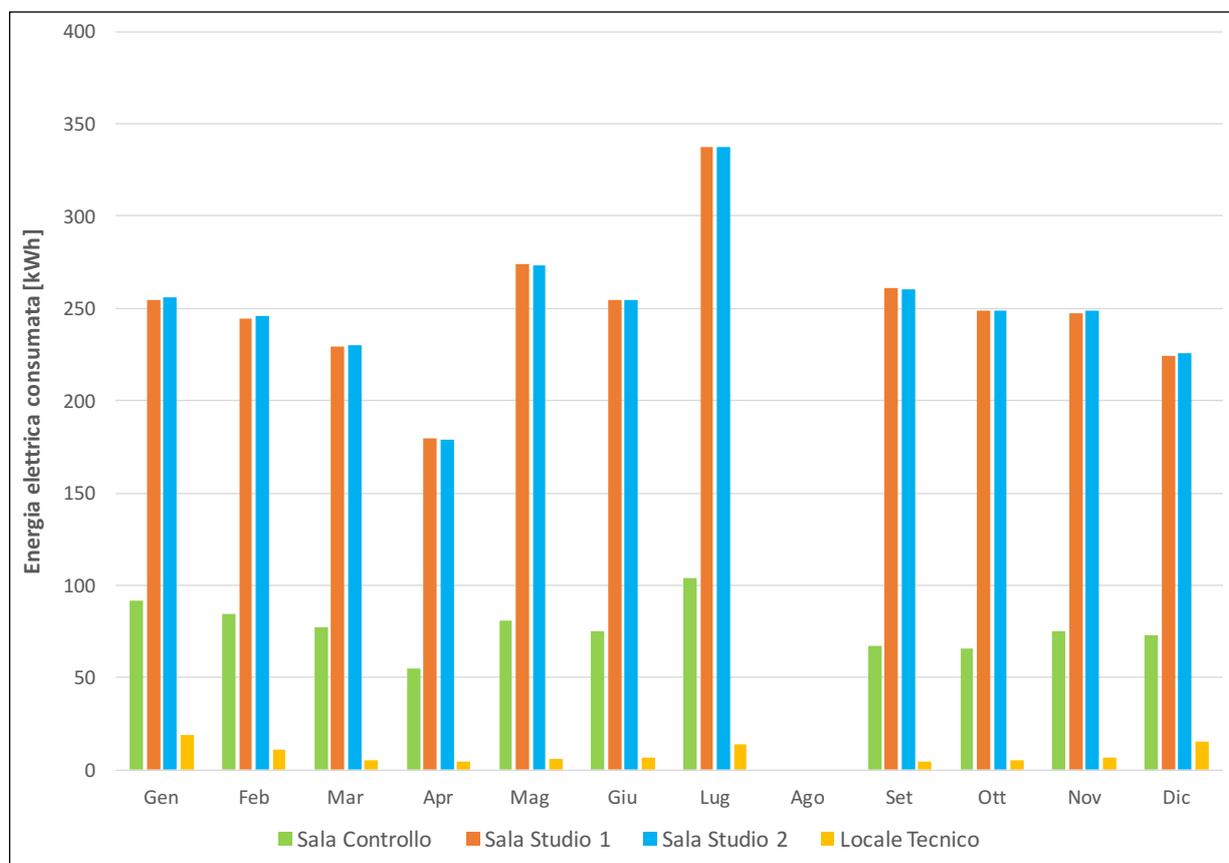


Figura 7.7: Consumi elettrici mensili

7.2 Analisi della produzione fotovoltaica

In questo paragrafo si uniscono i risultati dell'analisi dei consumi elettrici e dell'analisi della generazione fotovoltaica per verificare la capacità del generatore fotovoltaico di sopperire autonomamente ai consumi elettrici del modulo abitativo. In particolare, si andranno ad analizzare i giorni analizzati nel paragrafo 5.5.2 e i rispettivi mesi.

7.2.1 Analisi per la Sala Studio 1

La Sala Studio 1 ha associata la stringa orientata Sud-Est. I consumi elettrici annui totali sono pari a 2754 kWh/anno mentre la produzione da fotovoltaico è di 2345 kWh/anno: già da questo valore si evince che questa sola stringa non è in grado di coprire l'intero fabbisogno dell'aula. I consumi della Sala Studio sono molto alti soprattutto per quanto riguarda i computer, mentre la quota per riscaldare e raffreddare rappresenta come si è visto solo il 20 %.

Per ogni giorno analizzato si è effettuato il confronto tra la curva di carico e la curva di produzione di energia da fotovoltaico così da calcolare le quote di autosufficienza e autoconsumo. Queste quantità possono essere determinate anche graficamente, come è dimostrato nella figura 7.8: la curva in grigio rappresenta la quota di energia richiesta dal locale e corrisponde al carico elettrico come calcolato nel paragrafo 7.1, la quota in giallo rappresenta l'energia prodotta dal generatore fotovoltaico e autoconsumata, infine la quota rossa rappresenta l'energia in surplus che è diretta alle batterie o alle altre aree.

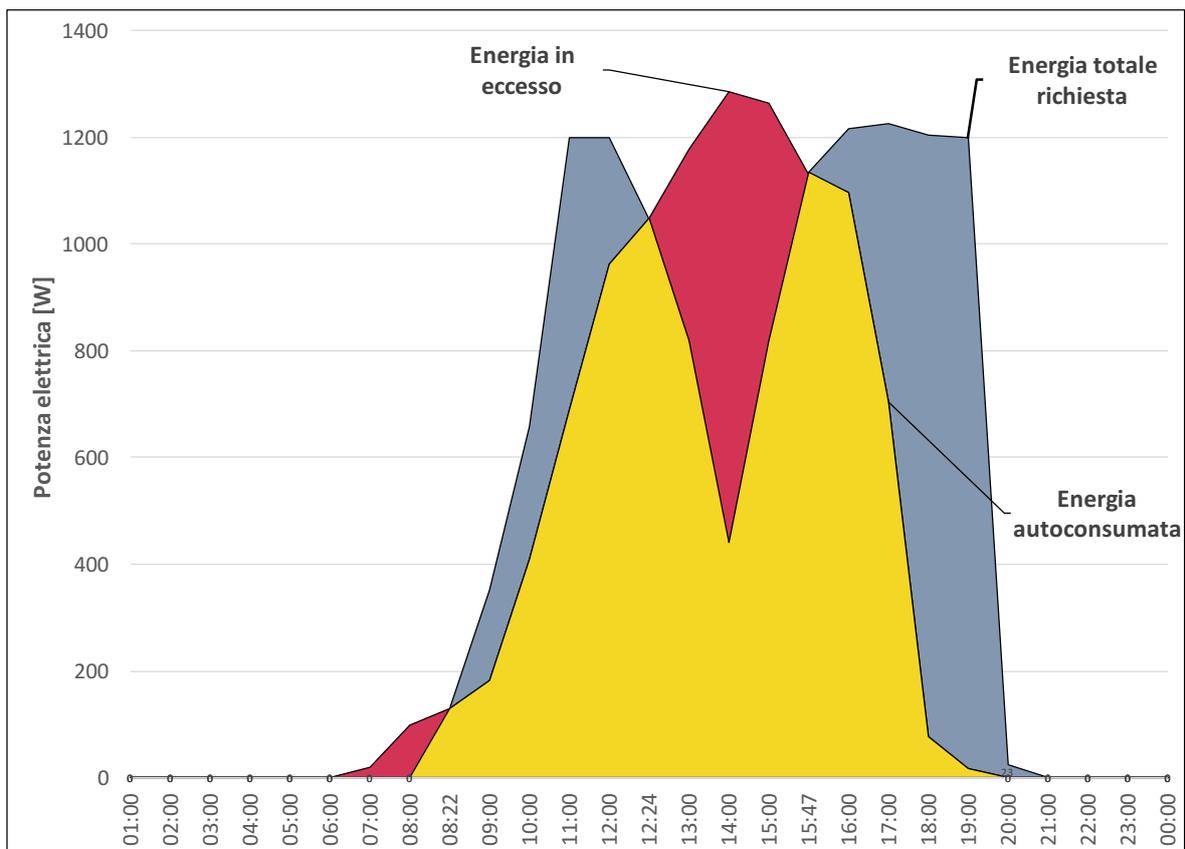


Figura 7.8: Schema di riferimento per il calcolo delle quote di autosufficienza e autoconsumo

Da questa immagine si possono definire le seguenti variabili:

$$E_{FV} = E_{AC} + E_{ecc} \quad (7.1)$$

dove E_{AC} rappresenta la quota di energia autoconsumata (area gialla), Wh, ed E_{ecc} è l'energia in eccesso (area rossa) da trasferire alle batterie o alla rete, Wh. Si può quindi definire l'autoconsumo come il rapporto tra l'area gialla e l'area rossa:

$$AC = \frac{E_{AC}}{E_{FV}} \quad (7.2)$$

Lo stesso procedimento vale per l'autosufficienza; si definisce:

$$E_C = E_{AP} + P \quad (7.3)$$

dove E_C rappresenta l'energia del carico elettrico da soddisfare (area grigia), Wh, E_{AP} è l'energia autoprodotta e impiegata per soddisfare il carico elettrico (area gialla), Wh, e P è l'energia richiesta dalla batteria o dalla rete per compensare le mancanze del fotovoltaico (differenza tra area grigia e area gialla), Wh. In questo caso l'autosufficienza è vista come il rapporto tra l'area gialla (E_{AP}) e l'area grigia:

$$AS = \frac{E_{AP}}{E_C} \quad (7.4)$$

Il giorno 15 gennaio la produzione da fotovoltaico non riesce a coprire il consumo di energia elettrica in nessun momento della giornata tranne nell'intervallo orario 13:00-14:00. Si tratta dell'ora che vede l'occupazione minima dell'aula studio con solo il 30 % di occupazione. Essendo i consumi dei computer, della ventilazione e del riscaldamento strettamente legati al numero di persone presenti, ne consegue che il carico elettrico è minimo. La quota di autoconsumo è pari al 96,7 %, infatti tutta l'energia prodotta viene immediatamente utilizzata, tranne per la quota tra le 13:00 e le 14:00 che è in surplus. L'autosufficienza è invece molto bassa e pari al 37 % poiché, come si vede dal grafico, la copertura del carico nel pomeriggio è minimale.

Durante tutto il mese di gennaio si vede come i consumi elettrici siano sempre maggiori rispetto alla produzione fotovoltaica. Il giorno peggiore è l'8 gennaio che coincide con l'apertura del modulo abitativo dopo le vacanze: il consumo della pompa di calore per il riscaldamento è massimo in quanto la giornata è particolarmente fredda e caratterizzata da cielo coperto, in quanto la produzione da fotovoltaica è molto bassa. Lo stesso si può dire per il 29, 30 e 31 di gennaio, per cui la produzione è assolutamente insufficiente: infatti l'autosufficienza per il 29 è pari all'8 %, un valore assolutamente insoddisfacente. In questo scenario occorre sfruttare al meglio le batterie e il surplus prodotto dalle stringhe sopra la Sala Controllo e sopra il Locale Tecnico.

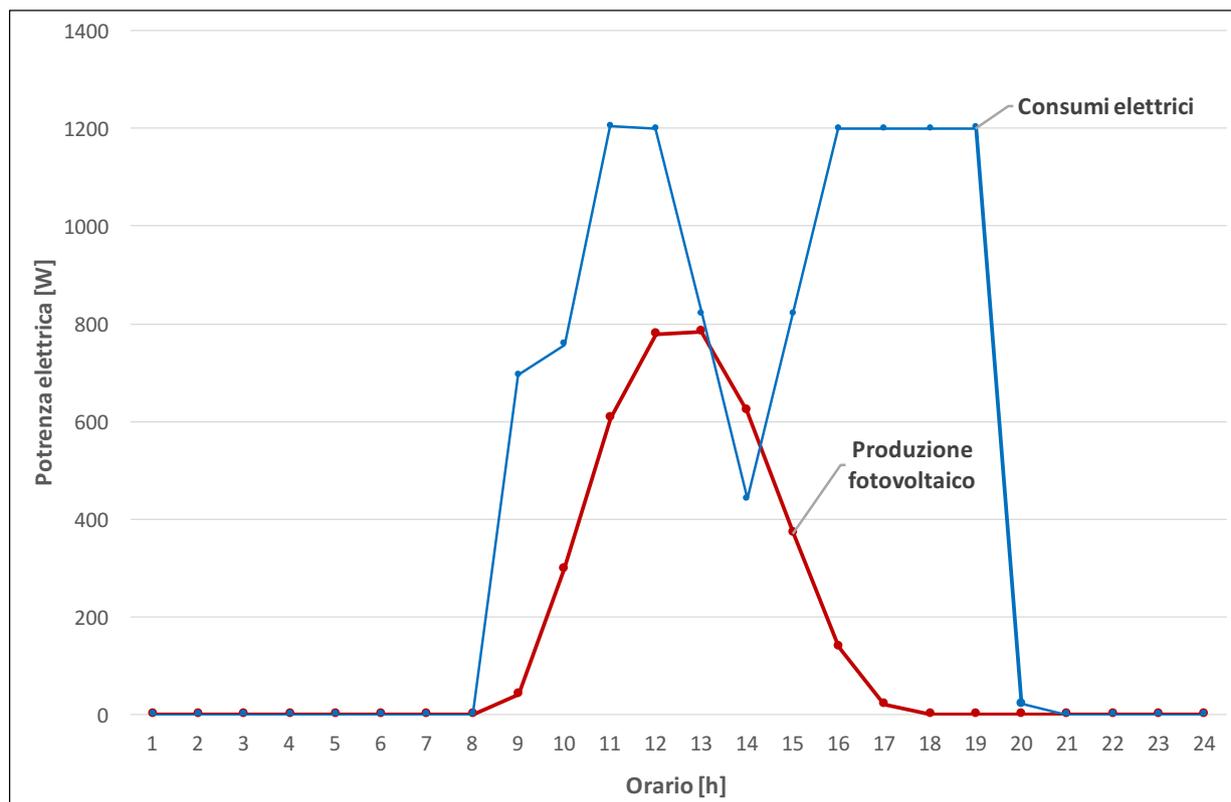


Figura 7.9: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il 15 gennaio

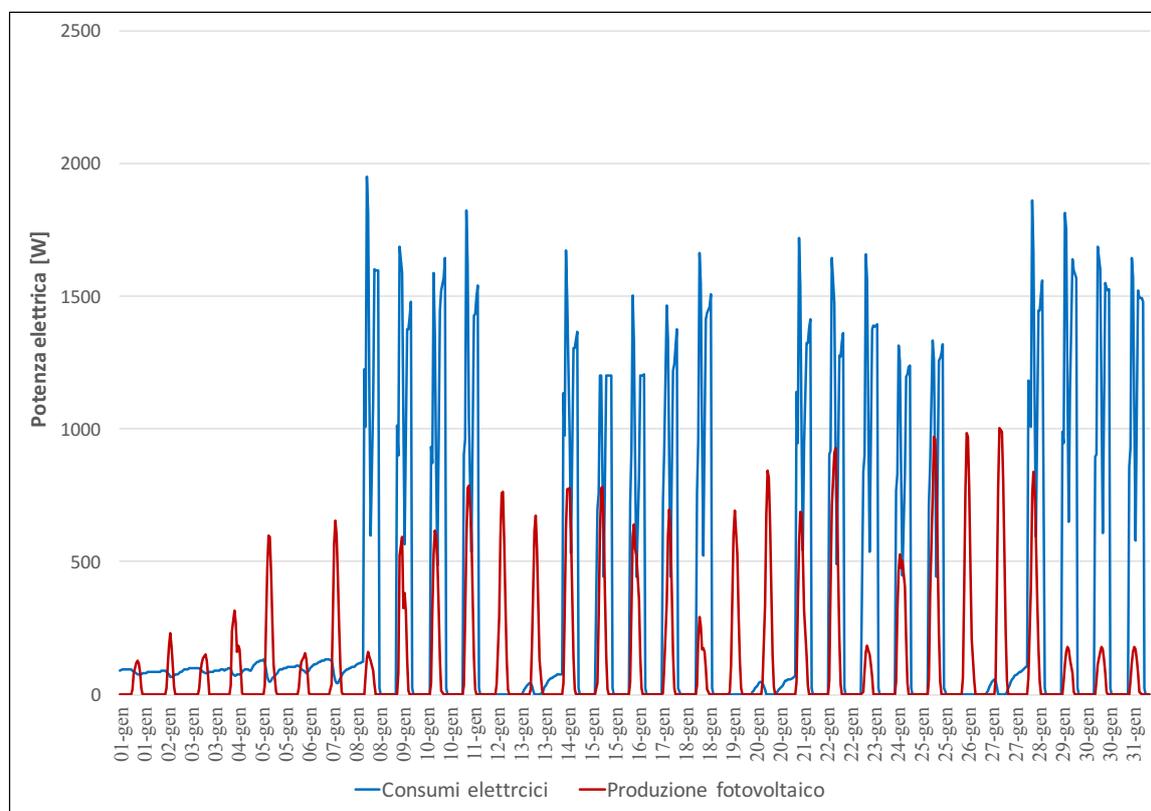


Figura 7.10: Confronto tra fotovoltaico e consumi della Sala Studio 1 nel mese di gennaio

E' interessante anche riportare il confronto tra produzione e carichi in una giornata a cielo coperto. Si sono scelti il 22 e il 23 gennaio che sono caratterizzati rispettivamente da cielo coperto e cielo sereno. Essendo la stringa orientata Sud-Est, il picco di potenza è spostato verso il mattino, alle 13:00, e la differenza tra i due massimi è notevole: il 22 si arriva a produrre 928 W, il 23 soltanto 183 W. In nessuna delle due giornate il carico elettrico è ricoperto interamente dal fotovoltaico: tuttavia al giorno 22 vi è un leggero eccesso di energia dalle 13:00 alle 14:00, quindi l'autoconsumo è molto vicino al 100% ma non sarà precisamente 100. Per quanto riguarda l'autosufficienza, entrambe le giornate sono lontane dal 100%, tuttavia il 23 il valore di autosufficienza ci si aspetta che sia notevolmente basso. L'autoconsumo e l'autosufficienza del 22 valgono rispettivamente 39% e 96%: come previsto l'autosufficienza è bassa e l'autoconsumo è quasi massimo. Per il 23 l'autoconsumo è ovviamente massimo e pari al 100%, mentre l'autosufficienza è estremamente ridotta, 8%.

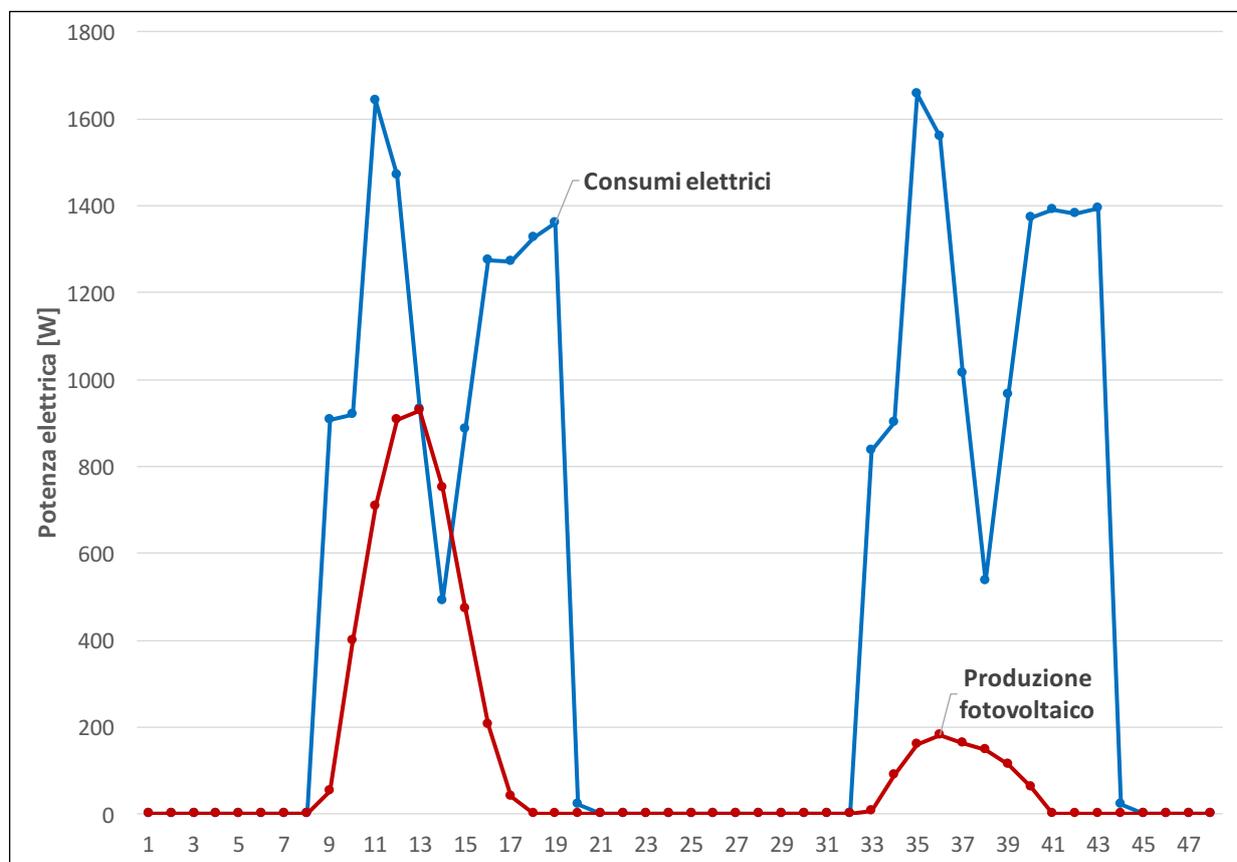


Figura 7.11: Confronto per il 22 e 23 gennaio: cielo sereno e cielo coperto

Per il mese di aprile si è scelto di studiare il 10 di aprile in quanto il 13 si tratta di un sabato e quindi è un giorno a cui non sono associati consumi significativi. In questo caso la produzione di fotovoltaico è in grado di ricoprire completamente il fabbisogno di fotovoltaico fino alle ore 15:00 e generando anche energia in surplus che sarà indirizzata verso le batterie. L'energia in eccesso deve essere stoccata per poter essere utilizzata nelle ore serali dalle 16:00 in avanti, quando la produzione da fotovoltaico non è più in grado di coprire i consumi. In questo caso la quota di Autoconsumo è pari al 60% con un surplus di energia nelle ore mattutine e l'autosufficienza è pari al 71 %. I consumi totali giornalieri sono pari a 10 kWh mentre la produzione è di 11,3 kWh, quindi è verosimile che l'energia in eccesso durante la mattinata sia in grado di sopperire alla produzione ridotta delle ore serali.

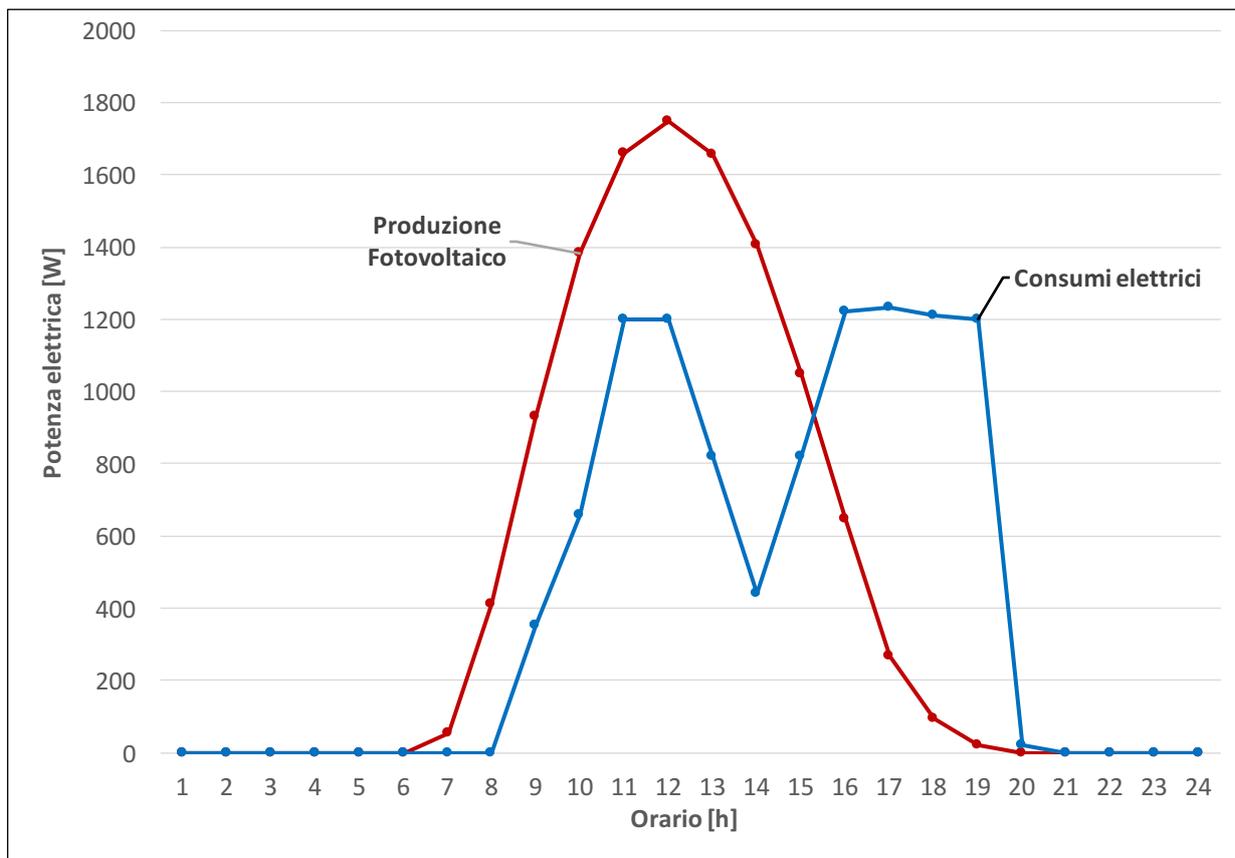


Figura 7.12: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il 10 aprile

Il confronto mensile tra la produzione di energia e i consumi mostra un andamento molto più favorevole rispetto al mese di gennaio. Nonostante gli elevati consumi elettrici della Sala Studio 1, il generatore fotovoltaico riesce a coprire il fabbisogno per le giornate a cielo sereno. Durante queste ultime si ha anche energia in eccesso che è possibile accumulare nelle batterie. Viceversa nei giorni di cielo coperto la produzione di energia non riesce a seguire la curva di carico e ci si ritrova in deficit di energia. Un esempio è il 16 aprile per cui si ha un'autofficienza del solo 40 % e un autoconsumo del 84 %. L'autoconsumo non è pari al 100 % poiché al mattino si ha produzione da fotovoltaico dalle 7:00 e l'aula studio apre alle 08:30.

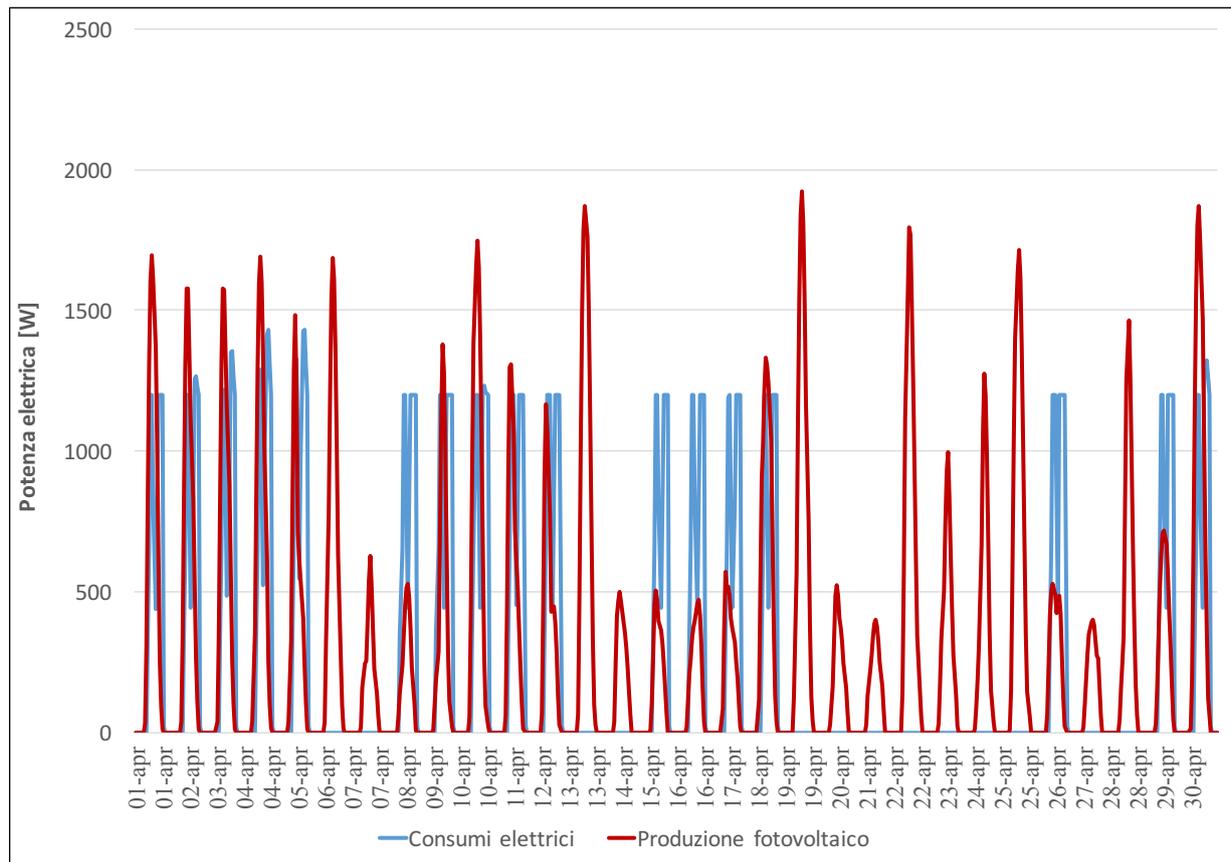


Figura 7.13: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il mese di aprile

Anche per il mese di aprile si considerano una giornata a cielo coperto, l'8 aprile, e una a cielo sereno, il 9 aprile. Rispetto a gennaio, la produzione a cielo coperto è in grado di fornire comunque 527 W di picco, contro i 1380 W. Per entrambe le giornate la produzione di energia non è sufficiente a coprire interamente il fabbisogno. L'8, a cielo coperto, ha un'autosufficienza del 38 %, valore di molto superiore rispetto al caso di gennaio, e l'autoconsumo è del 90 %: si ha un leggero eccesso di energia nella fascia oraria 13:00-14:00. Il 9 aprile l'autosufficienza è del 58%: il divario tra le due giornate è inferiore rispetto a gennaio. L'autoconsumo per il 9 è pari all'74%: una quota non trascurabile di energia è in eccesso dalle 12:00 alle 15:00 e viene accumulata nelle batterie.

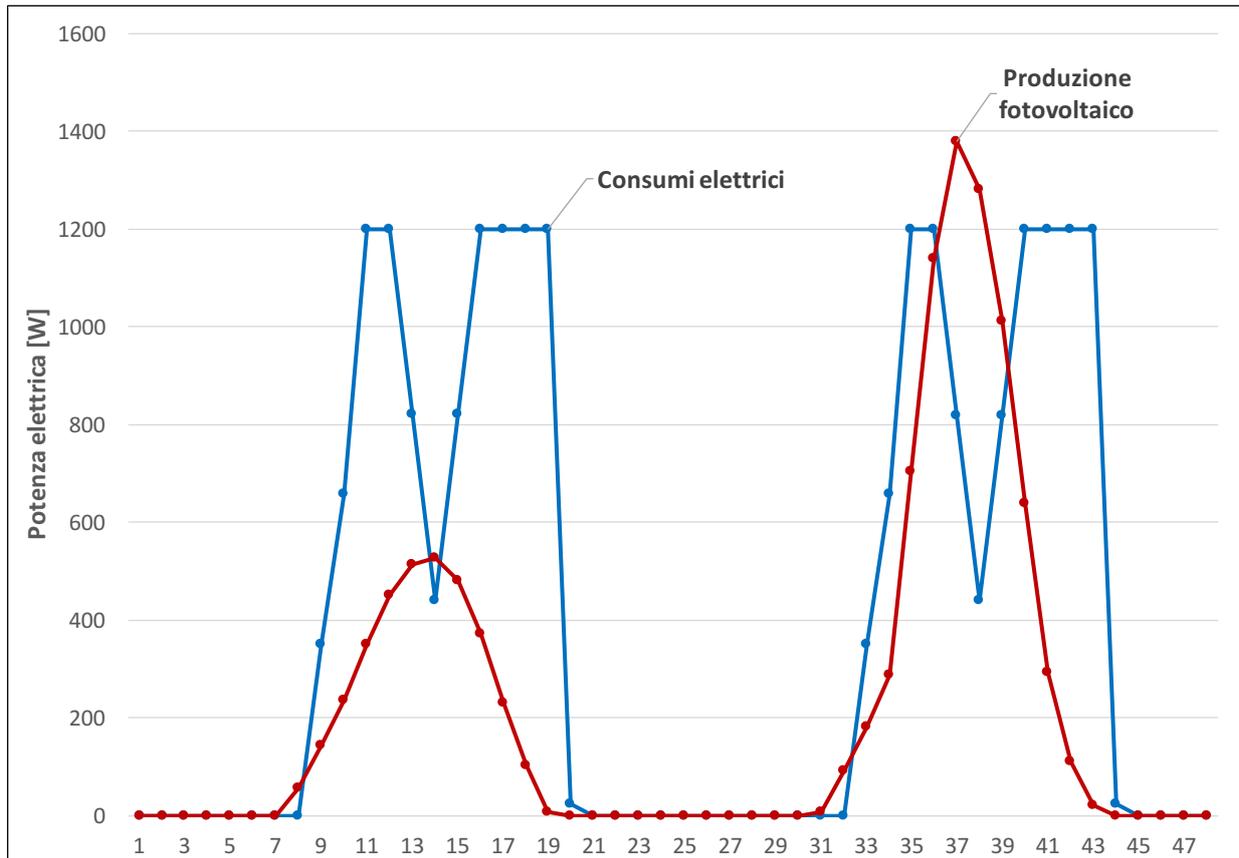


Figura 7.14: Confronto per l'8 e il 9 aprile: cielo sereno e cielo coperto per la Sala Studio 1

Il giorno 15 di luglio ha caratteristiche simili a quelle di aprile. La produzione da fotovoltaico è tale da coprire interamente il fabbisogno di energia elettrica fino alle 15:00 e al tempo stesso si ottiene energia in eccesso da indirizzare verso le batterie. I consumi sono più elevati rispetto al mese di aprile poiché il fabbisogno di raffrescamento è maggiore e quindi la pompa di calore consuma più energia. Nelle ore pomeridiane l'energia dal generatore copre solo in parte i consumi, la restante quota deve essere coperta dalle batterie. Il valore di autosufficienza è pari al 71 %, quello dell'autoconsumo è 75 % quindi ci si aspetta che la produzione da fotovoltaico non riesca a coprire totalmente i consumi della Sala Studio 1: infatti l'aula consuma 14,6 kWh e la produzione di energia è 13,6 kWh.

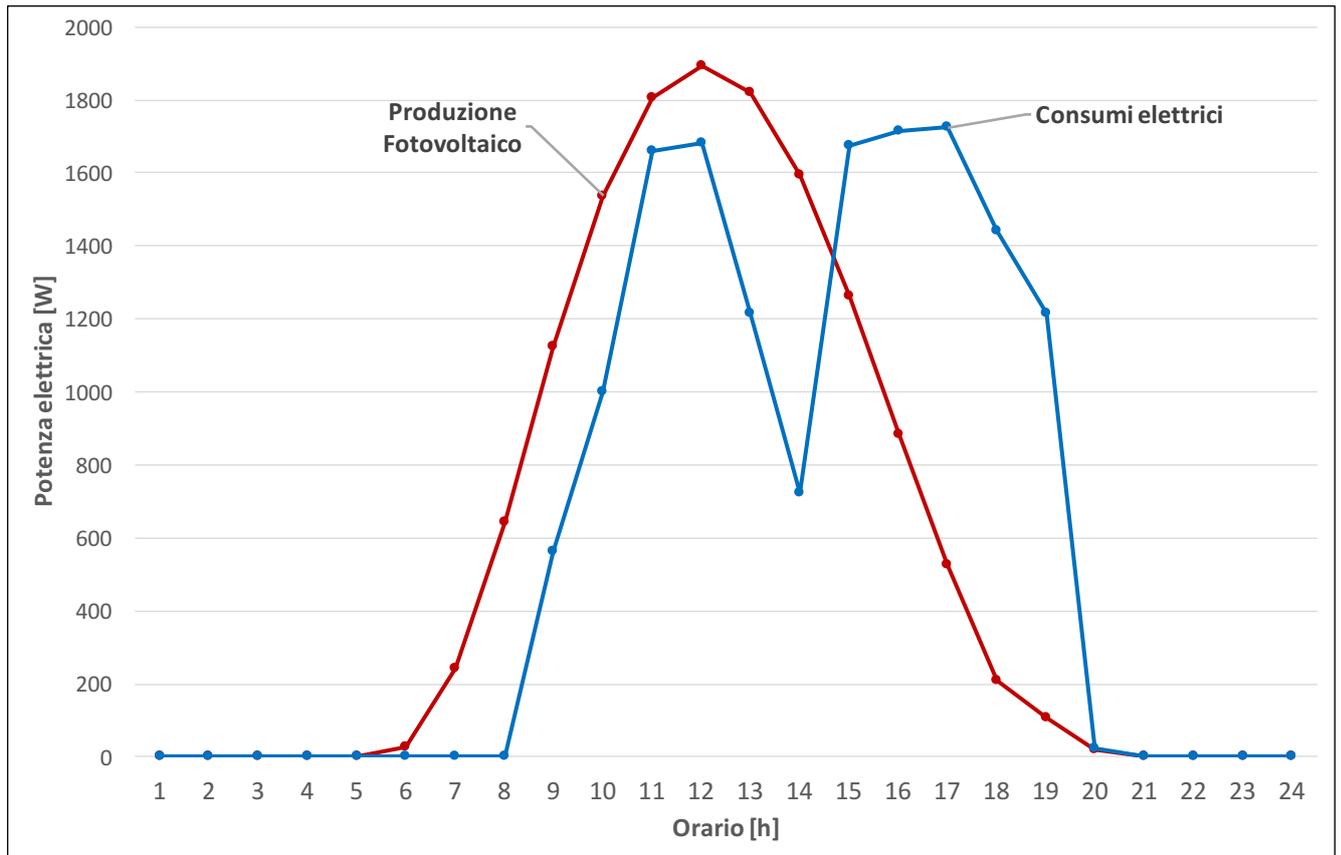


Figura 7.15: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il 15 luglio

Le prossime due immagini mostrano i consumi della pompa di calore in relazione ai consumi elettrici totali. Come già ipotizzato, i consumi della pompa di calore per il 15 luglio sono nettamente superiori e contribuiscono con una grande quota ai consumi complessivi. La quota di energia associata al raffreddamento per aprile è trascurabile rispetto ai consumi delle altre attrezzature. Anche il valore di picco per aprile è nettamente inferiore, $1200 W_{el}$ contro i $1800 W_{el}$ di luglio.

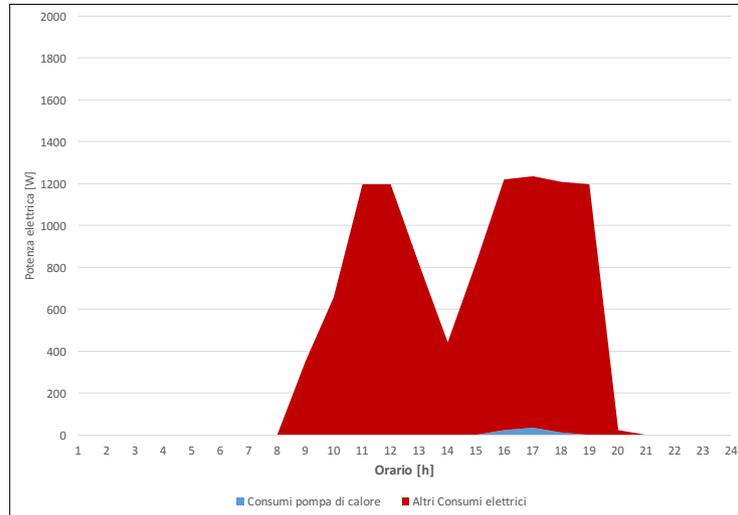


Figura 7.16: Confronto tra i consumi della pompa di calore e i consumi totali per il 10 aprile

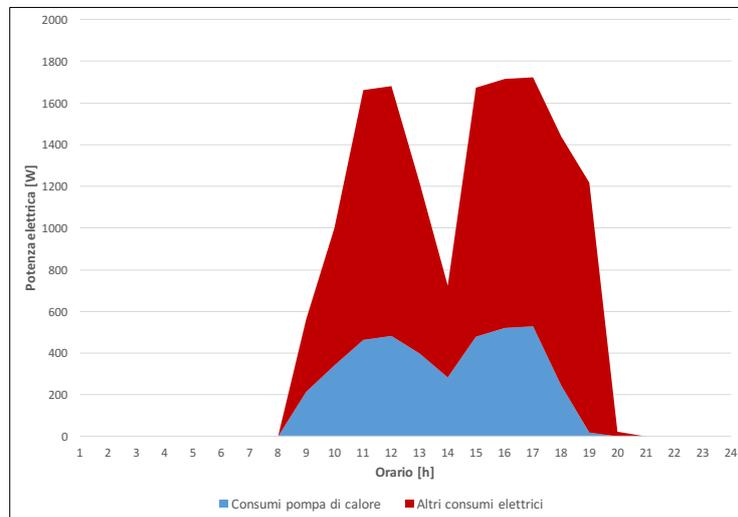


Figura 7.17: Confronto tra i consumi della pompa di calore e i consumi totali per il 15 luglio

L'ultimo grafico mostra il confronto tra i consumi mensili della Sala Studio 1 e la produzione di energia da fotovoltaico per il mese di luglio. Il mese di luglio si attesta come ottimo per il fotovoltaico: non solo il generatore riesce quasi sempre a coprire i consumi, ma genera anche un notevole surplus di energia. Per i primi giorni del mese la stringa non riesce totalmente a soddisfare il fabbisogno a causa del cielo coperto, in particolare il 4 luglio si rivela essere un giorno difficile da gestire. Per questa giornata si ha un'autosufficienza del 30 % e un autoconsumo molto elevato del 85 % con energia in eccesso dalle 07:00 alle 08:00 quando il locale è ancora chiuso. Dal 15 al 23 luglio invece la curva di generazione supera quella di carico e permette lo stoccaggio di energia. Il mese di luglio ha consumi energetici molto alti a causa del raffrescamento, ma ha anche a disposizione un'elevata risorsa solare che riesce a compensare i carichi per la maggior parte del mese.

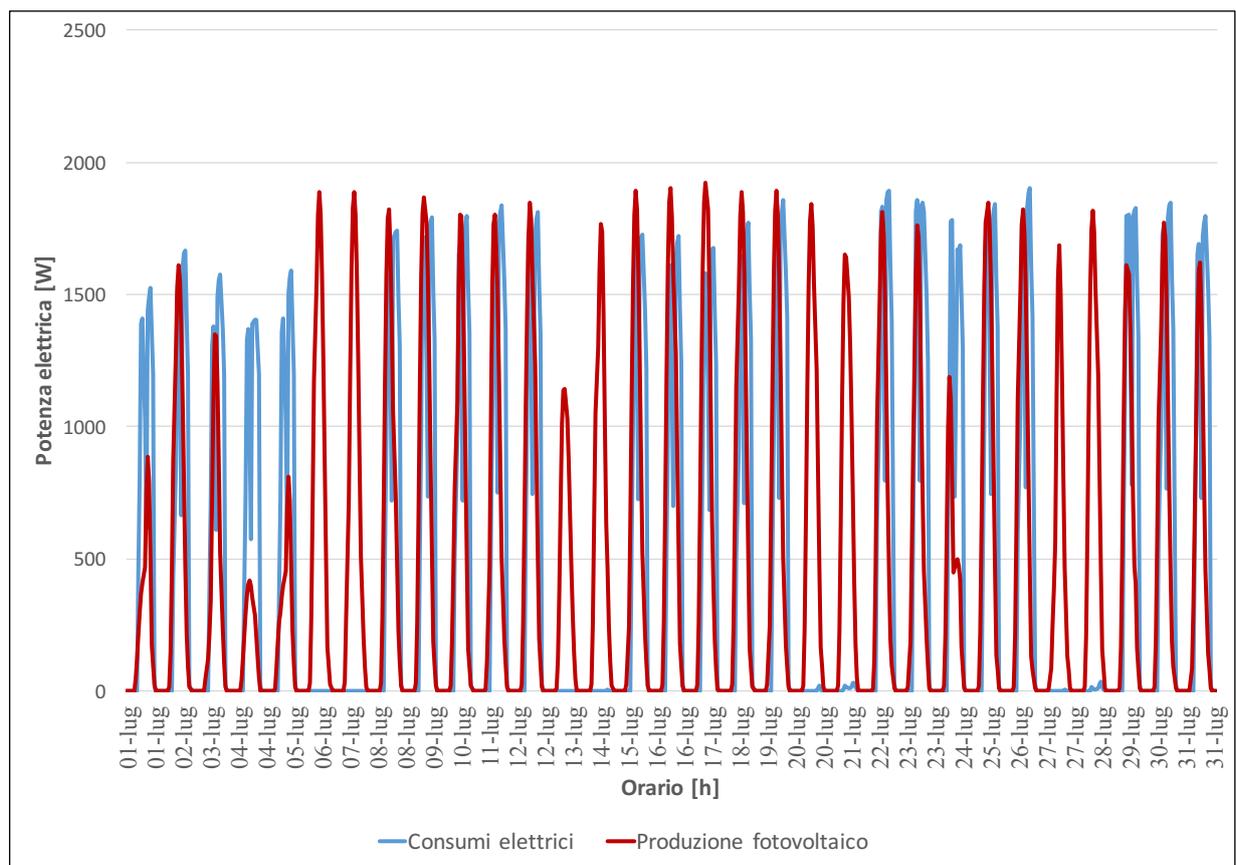


Figura 7.18: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il mese di luglio

L'ultimo giorno analizzato in questa simulazione è il 15 di ottobre. La produzione di energia da fotovoltaico è in grado di soddisfare il fabbisogno elettrico fino alle ore 14:00, anche se non riesce a raggiungere il picco mattutino delle ore 12:00. Tuttavia al mattino si ha un surplus di energia che riesca a bilanciare il picco delle ore 12:00. Nelle ore pomeridiane il generatore è assolutamente insufficiente per coprire il carico elettrico, infatti, come si vede dal prossimo grafico, solo una piccola parte della curva è coperta. Dalle 13:00 alle 14:30 circa si ha un surplus di energia quando la Sala Studio vede l'affollamento minimo. Il valore di autosufficienza è del 59 % con il disaccoppiamento maggiore che accade nelle ore serali, l'autoconsumo è dell' 82 % con surplus di energia nelle ore del mattino fino alle 10:30 e nelle ore della pausa pranzo dalle 13:00 alle 14:30.

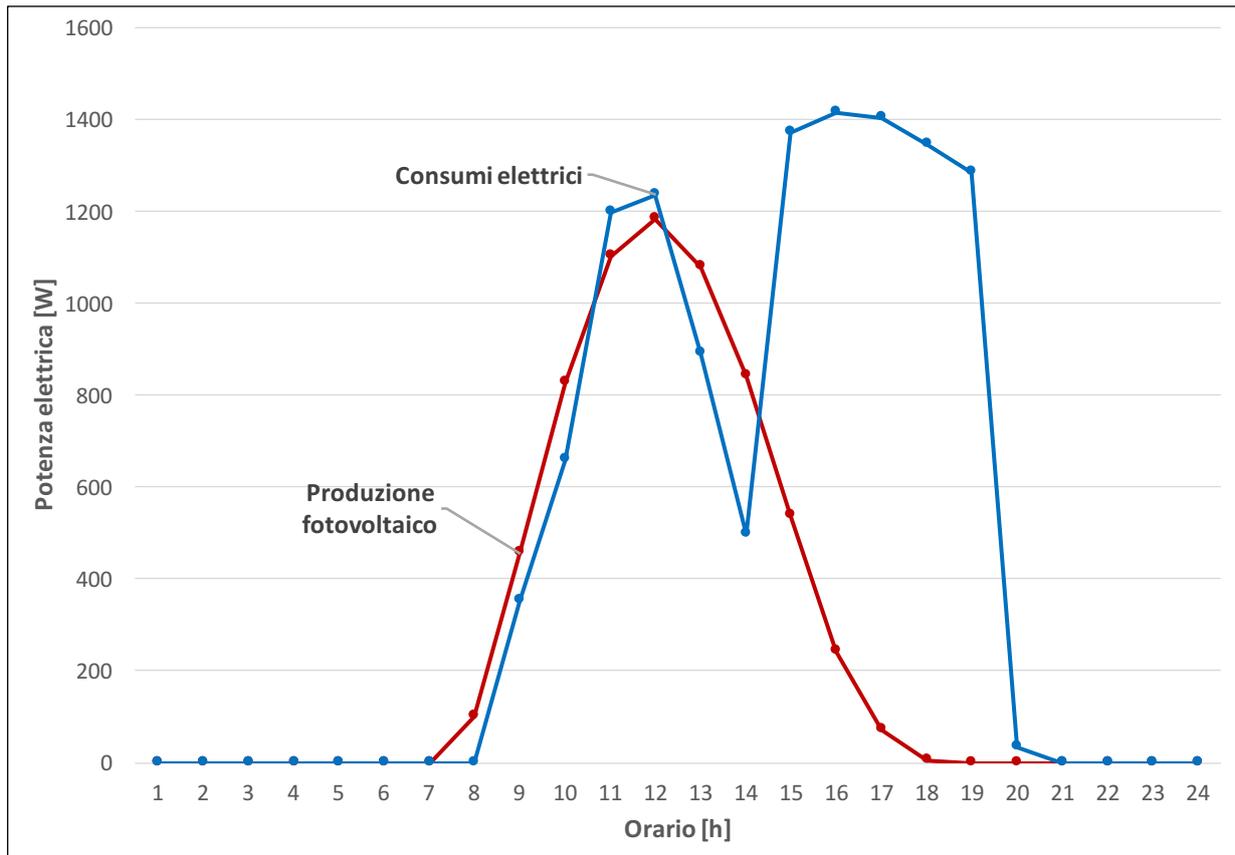


Figura 7.19: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il 15 ottobre

Il prossimo grafico mostra il confronto mensile per ottobre tra i carichi elettrici e la produzione fotovoltaica. A parte il 2 ottobre che vede una produzione eccezionale di energia da parte del fotovoltaico, per i restanti giorni il generatore non è sufficiente a coprire per intero i consumi elettrici. Per i giorni del 7,8, 14 e 15 la produzione di energia elettrica non copre totalmente i picchi della curva di carico, anche se la frazione di energia coperta dal fotovoltaico è molto maggiore rispetto al mese di gennaio, pur essendo inferiore rispetto ad aprile. Per il 7 ottobre si un'autosufficienza del 60 % e un autoconsumo dell'82% con i surplus di energia sempre nelle ore del mattino, visto l'orientamento prevalente verso Est, e nell'ora di pranzo. Da questi risultati è evidente che per questa giornata sarà necessaria energia dalle batterie per sopperire al deficit di energia soprattutto nelle ore serali. Nei giorni di cielo coperto la produzione si dimostra insufficiente: un esempio è il 3 ottobre, quando solo una minima quota del fabbisogno

riesce ad essere soddisfatta. Lo stoccaggio di energia rivesta anche qua un ruolo centrale: è possibile accumulare una notevole quantità di energia durante sabato e domenica quando l'edificio è inutilizzato e i consumi sono al minimo. In quelle giornate sono presenti solo i consumi della pompa di calore per mantenere la temperatura a 15 °Ci.

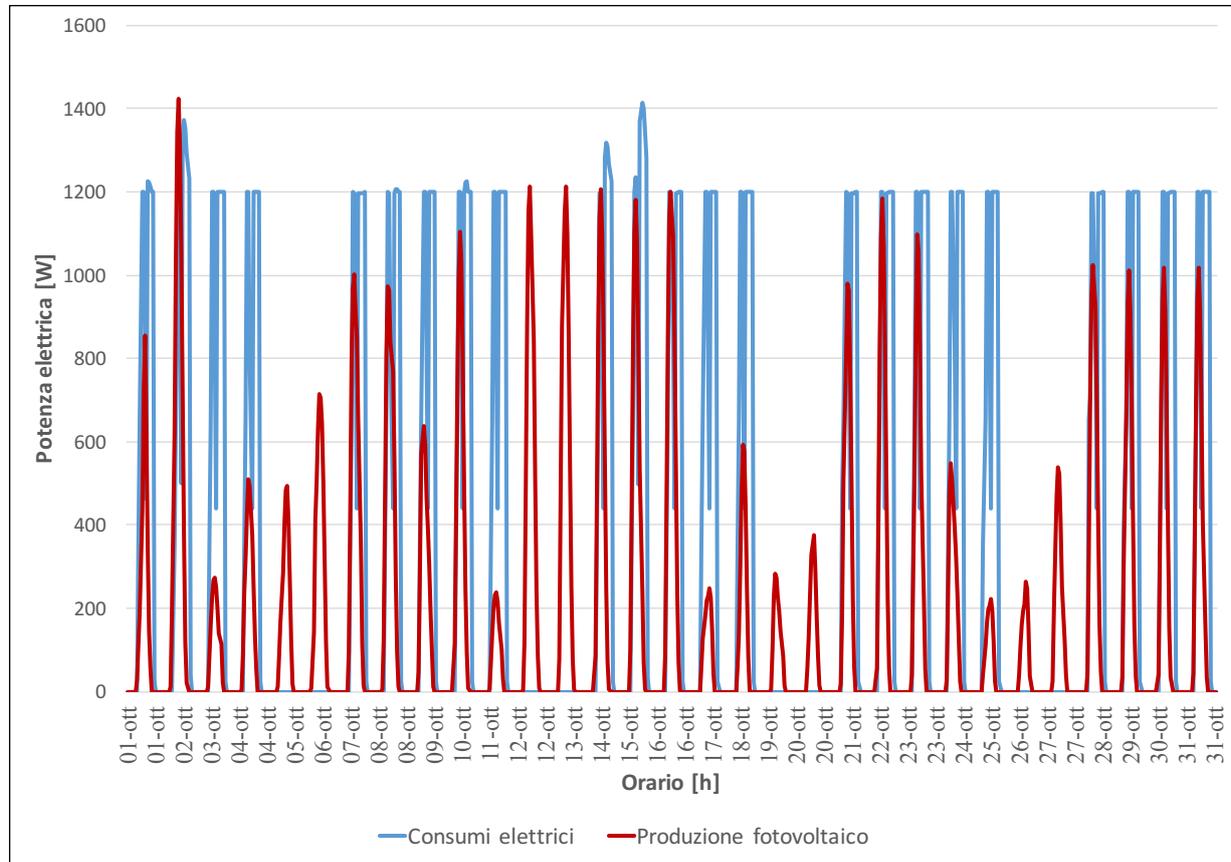


Figura 7.20: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 1 per il mese di ottobre

Il prossimo grafico ad istogramma riporta per ogni mese i consumi elettrici abbinati alla produzione fotovoltaica della stringa orientata Sud-Est. Come era ipotizzabile, nei mesi invernali di gennaio, febbraio e dicembre la produzione di energia da fotovoltaico è inadatta a ricoprire i consumi. Viceversa da aprile a luglio il generatore riesce a coprire il consumo mensile. I consumi estivi sono molto elevati a causa del sistema di raffrescamento, ma anche la produzione è altrettanto alta, essendo i mesi aventi a disposizione più ore di radiazione e più giornate a cielo sereno. Per agosto non si sono rappresentati i consumi per il modulo abitativo è chiuso al pubblico e non è raffrescato se non per mantenere la temperatura esterna sotto i 35°C. Il mese con la producibilità più bassa è dicembre, mentre quello con l'energia prodotta maggiore è luglio. Si riportano per ogni mese i valori di Autoconsumo e Autosufficienza calcolati con la seguente strategia: tramite il software *Matlab* si sono eseguiti i calcoli secondo le formule (2.26) e (2.27), poi per ogni giorno di ogni mese si è calcolato il valore di Autosufficienza e Autoconsumo per poi fare una media mensile dividendo per il numero di giorni utili, ovvero trascurando fine settimana e festività.

Tabella 7.2: Analisi dei consumi e della produzione per la Sala Studio 1

	E cons kWh	E fot kWh	AS %	AC %
Gennaio	254	81	28	92
Febbraio	244	117	40	93
Marzo	229	177	53	81
Aprile	179	226	63	71
Maggio	274	287	67	64
Giugno	254	312	65	69
Luglio	337	354	66	67
Agosto	0	307	100	0
Settembre	260	201	53	80
Ottobre	248	133	49	83
Novembre	247	86	31	88
Dicembre	223	65	22	99
Annuale	2754	2631	53	73

Infine l'ultimo grafico per la Sala Studio 1 riporta il confronto per ogni mese dei valori di Autoconsumo e Autosufficienza. Il primo valore è decisamente elevato per quanto riguarda i mesi di gennaio, febbraio e marzo caratterizzati da irradianze contenute, infatti il generatore non è in grado di coprire completamente il fabbisogno elettrico e pertanto tutta l'energia prodotta è immediatamente consumata. Un possibile motivo per cui non si abbia l'autoconsumo totale al 100% in questi mesi è perché si ha spesso un leggero surplus di energia nella fascia oraria 12:30-14:00, quando si ha il picco nella produzione di energia e il minimo dei consumi per la bassa occupazione. I mesi di maggio, giugno e luglio hanno valori più contenuti dell'autoconsumo poiché, essendo i mesi caratterizzati da irradianze più elevate, si ha molta energia in surplus. Da settembre fino a dicembre l'autoconsumo sale nuovamente poiché vale lo stesso discorso fatto per i mesi da gennaio a marzo.

L'Autosufficienza è minima per il mese di dicembre, 22%, infatti dall'altro lato l'autoconsumo è molto elevato poiché tutta l'energia prodotta è impiegata nell'immediato per coprire il carico elettrico; per questo mese è cruciale l'uso dell'accumulo e dell'interscambio di energia tra le aree. Da gennaio a luglio il valore di Autosufficienza cresce fino a raggiungere il massimo a luglio pari al 66%. Nei mesi da aprile a luglio la distanza tra autoconsumo e autosufficienza è molto ridotta e ci si aspetta pertanto che con la quota non autoconsumata, quindi in eccesso, si riesca a coprire la parte restante del carico elettrico.

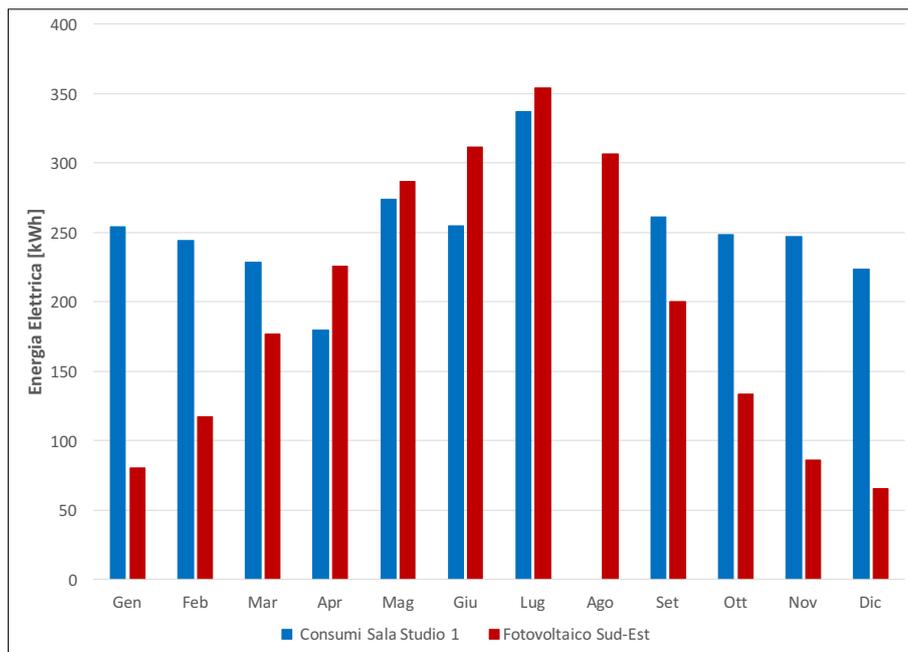


Figura 7.21: Confronto dei consumi elettrici con la produzione di energia elettrica per la Sala Studio 1

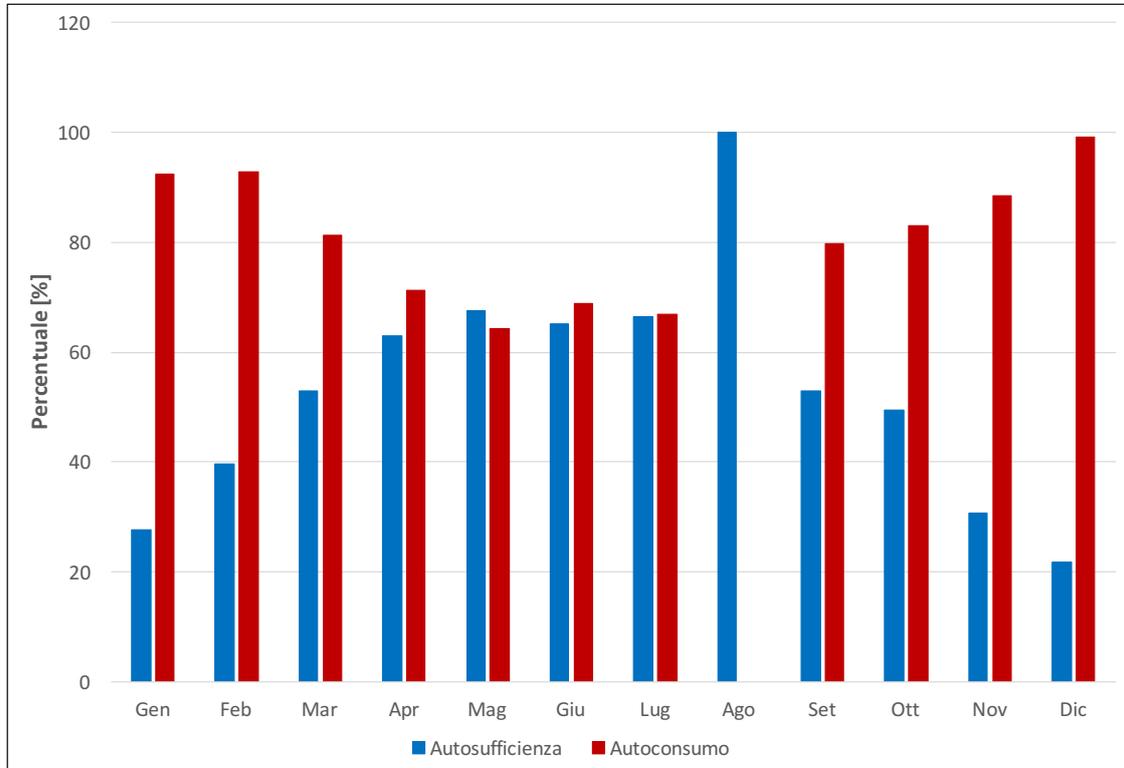


Figura 7.22: Rappresentazione dei valori di Autosufficienza e Autoconsumo per la Sala Studio 1

7.2.2 Analisi per la Sala Studio 2

La Sala Studio 2 ha associata la stringa orientata Nord-Ovest. Dal punto di vista della produzione fotovoltaica si tratta dell'orientamento più sfavorevole, inoltre è la stringa che al pomeriggio soffre di più l'ombreggiamento della parete de I3P. Il consumo elettrico annuale della Sala Studio 2 è pari a 2760 kWh/anno, leggermente di più che la sala gemella a causa del contatto con il Locale Tecnico che causa un fabbisogno per riscaldamento maggiore. L'energia prodotta in un anno dalla stringa è pari a 1793 kWh/anno: è il valore minore rispetto a tutte le altre stringhe e non è sufficiente a ricoprire il totale dei consumi elettrici annui. L'inclinazione di 20° rispetto all'orizzontale causa una minore produzione nei mesi invernali ma maggiore nei mesi estivi. Dunque ci si aspetta che nella stagione invernale la produzione di energia ricoprirà solo in minima parte i consumi elettrici.

Quanto appena detto emerge nell'analisi del giorno 15 gennaio. Pur trattandosi di un giorno caratterizzato da cielo sereno, la produzione di energia fotovoltaica non riesce a coprire i carichi elettrici nella sua interezza. L'energia da fotovoltaico è in ogni punto minore rispetto alla stringa Sud-Est sopra l'altra aula studio, inoltre mentre nell'altro caso si aveva dalle 13 alle 14:00 un surplus di energia, qui per questa aula non si ha energia in eccesso ma viene tutta consumata nell'immediato. L'autoconsumo è quindi del 100 % in quanto tutta l'energia prodotta viene immediatamente utilizzata, ma l'autosufficienza è molto bassa e pari al 21,7%. Se si considerano il consumo totale giornaliero della Sala Studio 2 pari a 10,7 kWh e la produzione del generatore pari a 2 kWh, si nota subito come la produzione sia inadeguata per coprire il fabbisogno. Per ridurre a distanza tra consumi e produzione si potrebbe limitare l'orario di apertura dell'aula per ridurre i consumi serali o ridurre l'occupazione da 10 ad 8 persone, per esempio. Altrimenti bisogna contare sulle batterie al litio e sul trasferimento di energia in eccesso dalle altre stringhe al locale che più ne necessita. Infine si può notare l'effetto dell'orientamento verso Ovest, notando che la produzione è spostata verso le ore pomeridiane, a differenza della stringa sopra la Sala Studio 1 la cui produzione è più spostata verso il mattino.

Come per la Sala Studio 1, si riporta il confronto mensile tra il carico elettrico e la produzione da fotovoltaico. Si nota come per tutti i giorni del mese l'energia dal generatore copre una parte molto ridotta del carico elettrico: se si considerano i giorni della prima settimana, dall'8 all'11, il fabbisogno elettrico è nettamente scoperto, tanto da essere superiore fino a 4 volte la produzione di energia. Nei giorni a cielo coperto il 29, 30 e 31, la situazione è ancora più gravosa poiché la produzione, già penalizzata per l'esposizione non favorevole, è oltremodo ridotta dalla bassa irradianza. Il 31 gennaio la situazione è critica poiché l'autosufficienza è pari solo al 7%, mentre l'autoconsumo è massimo e pari al 100%: per questa giornata risulta fondamentale l'impiego dell'accumulo e dello scambio tra i diversi locali; in alternativa si può pensare ad un utilizzo ridotto dell'aula studio sia per quanto riguarda l'orario sia per il numero massimo di persone. Per il mese di gennaio le batterie giocano un ruolo fondamentale, ma prima ancora, si può puntare sull'interscambio di energia tra le stringhe qualora l'energia prodotta per una zona sia maggiore dei consumi.

Anche per la Sala Studio 2 si riporta il confronto tra le condizioni di cielo sereno e coperto, prendendo come giorni studio, gli stessi giorni considerati per la Sala Studio 1, ovvero il 22 e il 23 gennaio. In queste due giornate è notevole la diminuzione di produzione di energia a causa dell'orientamento sfavorevole verso Nord-Ovest. L'energia prodotta non è in grado di sopperire all'intero fabbisogno in nessuna delle due giornate, infatti ci si aspetta valori di autoconsumo molto elevati e di autosufficienza esigui. Per il 22 gennaio l'autosufficienza è pari al 28%: si osserva una riduzione del 10% rispetto alla Sala Studio 1 proprio a causa dell'esposizione verso Nord-Ovest; l'autoconsumo è del 99,6%, praticamente pari al 110% se non per un'infinitesima quota di energia in eccesso alle ore 14:00. Per il 23 i valori sono più pessimistici: l'autosufficienza è molto bassa e pari al 7 contro l'8% della Sala Studio 1; l'autoconsumo è pari al 100% come nel caso precedente. Il 23 gennaio è una giornata critica in quanto, essendo una giornata fredda, l'energia richiesta dalla pompa di calore per riscaldare è elevata. Bisogna, dunque, gestire in maniera ottimale l'accumulo e l'interscambio di energia tra le varie zone per provare ad aumentare l'autosufficienza dell'ambiente.

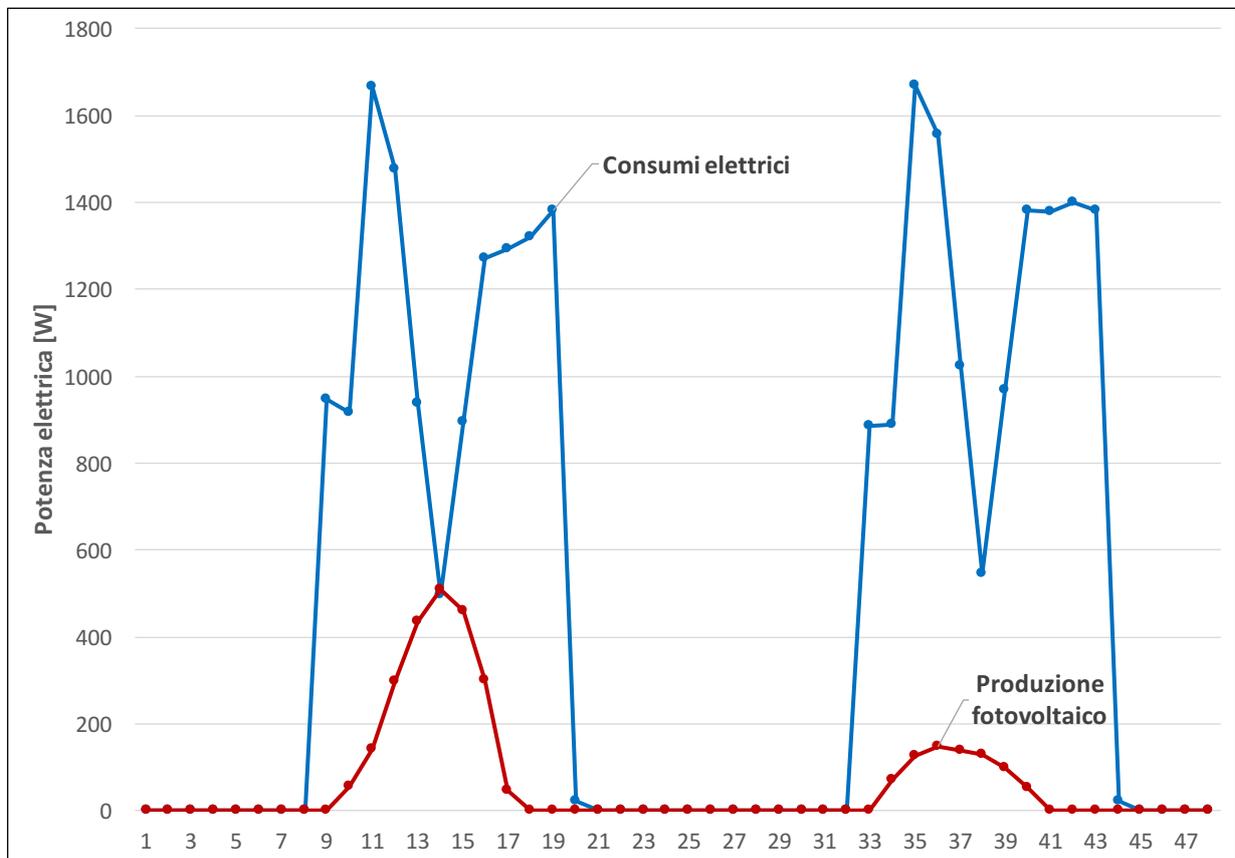


Figura 7.25: Confronto per il 22 e 23 gennaio: cielo sereno e cielo coperto per la Sala Studio 2

Per il 10 aprile la situazione è decisamente più favorevole. L'energia da fotovoltaico in questa giornata è elevata ed in grado di sopperire ai carichi elettrici soprattutto nelle ore centrali della giornata. Dalle 09:00 alle 12:30 l'energia prodotta è più bassa rispetto al consumo mentre dalle 12:30 alle 16:00 si ha una grande quantità di energia in eccesso. Infatti in quelle ore si ha il minimo nella curva di carico per la pausa pranzo e in contemporanea si ha il picco della produzione fotovoltaica. L'energia in eccesso deve essere indirizzata alle batterie per sopperire alle carenze nelle ore serali: dalle 16:00 in avanti la produzione di energia diminuisce mentre il carico elettrico raggiunge nuovamente i valori più alti. L'autosufficienza per questa giornata è pari al 64 % e l'autoconsumo è del 74%: i consumi non sono totalmente coperti neanche con l'impiego delle batterie, infatti il consumo giornaliero è pari a 11 kWh mentre la produzione è 8 kWh, quindi per questa giornata bisogna contare sullo scambio di energia tra i locali. Infatti la Sala Studio 1 riesce ad essere indipendente grazie alle batterie, ma riesce appena a soddisfare il suo fabbisogno, ma, come si vedrà nel prossimo paragrafo, vi è una grande quota di energia in eccesso dal generatore che comprende le stringhe Sud-Ovest e Nord-Est.

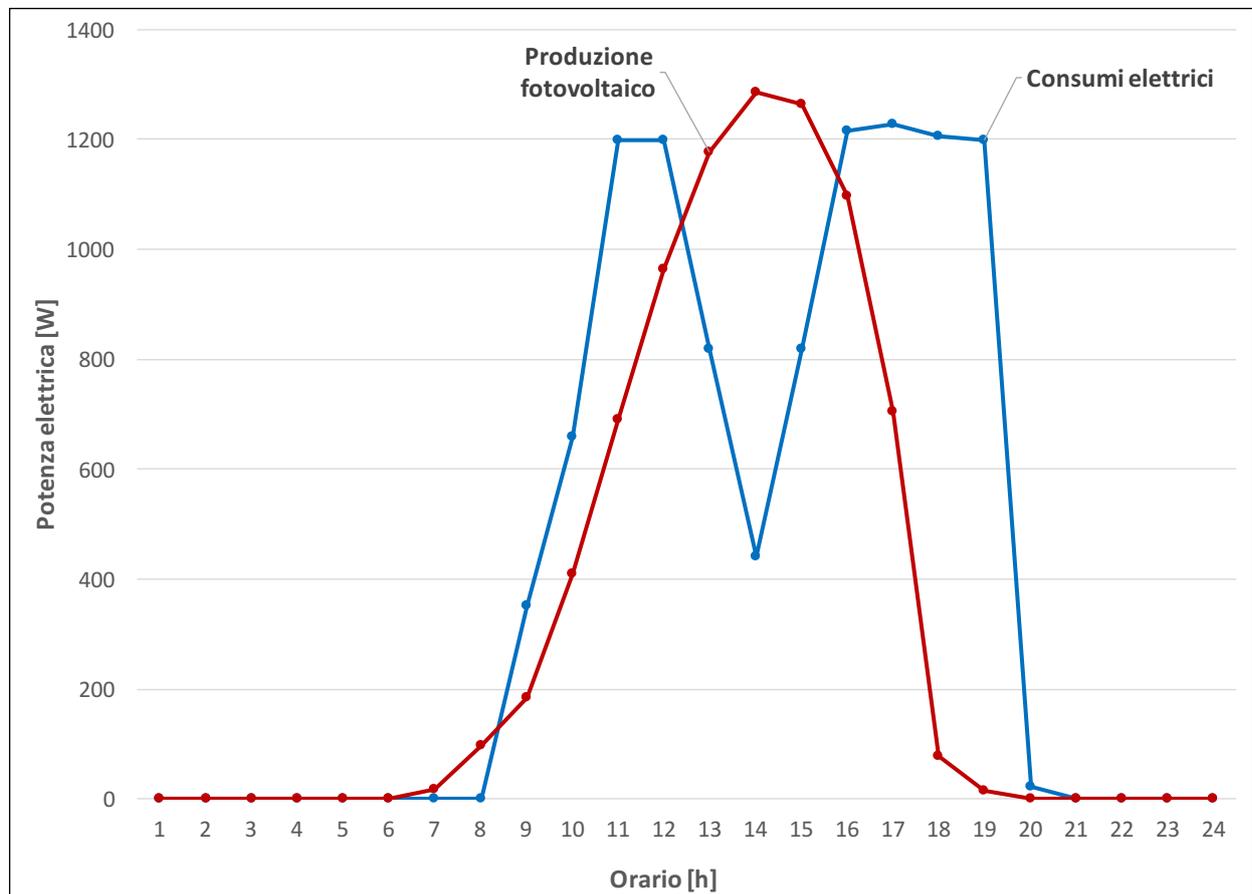


Figura 7.26: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 2 per il 10 aprile

Il prossimo grafico mostra il confronto mensile per aprile dei carichi elettrici e della produzione da fotovoltaico. E' evidente la differenza rispetto all'accoppiamento carichi-produzione della Sala Studio 1: in questa situazione il generatore non riesce a coprire totalmente i consumi elettrici nemmeno nei giorni ad alto irraggiamento. L'unica eccezione è rappresentata dal 30 aprile che presenta un picco nella produzione; si hanno dei valori più alti rispetto alla media anche per il 13 e il 19 ma, essendo il primo un sabato e l'altro un

giorno di festa, non si hanno vantaggi se non lo stoccaggio di energia tramite le batterie. I giorni 15, 16 e 17 sono caratterizzati da cielo coperto in quanto si nota chiaramente che la produzione è insufficiente per coprire il fabbisogno elettrico. Lo stesso accade per la Sala Studio 1, ma in quella circostanza la produzione da fotovoltaico è maggiore per l'orientamento più favorevole, dunque il divario è inferiore.

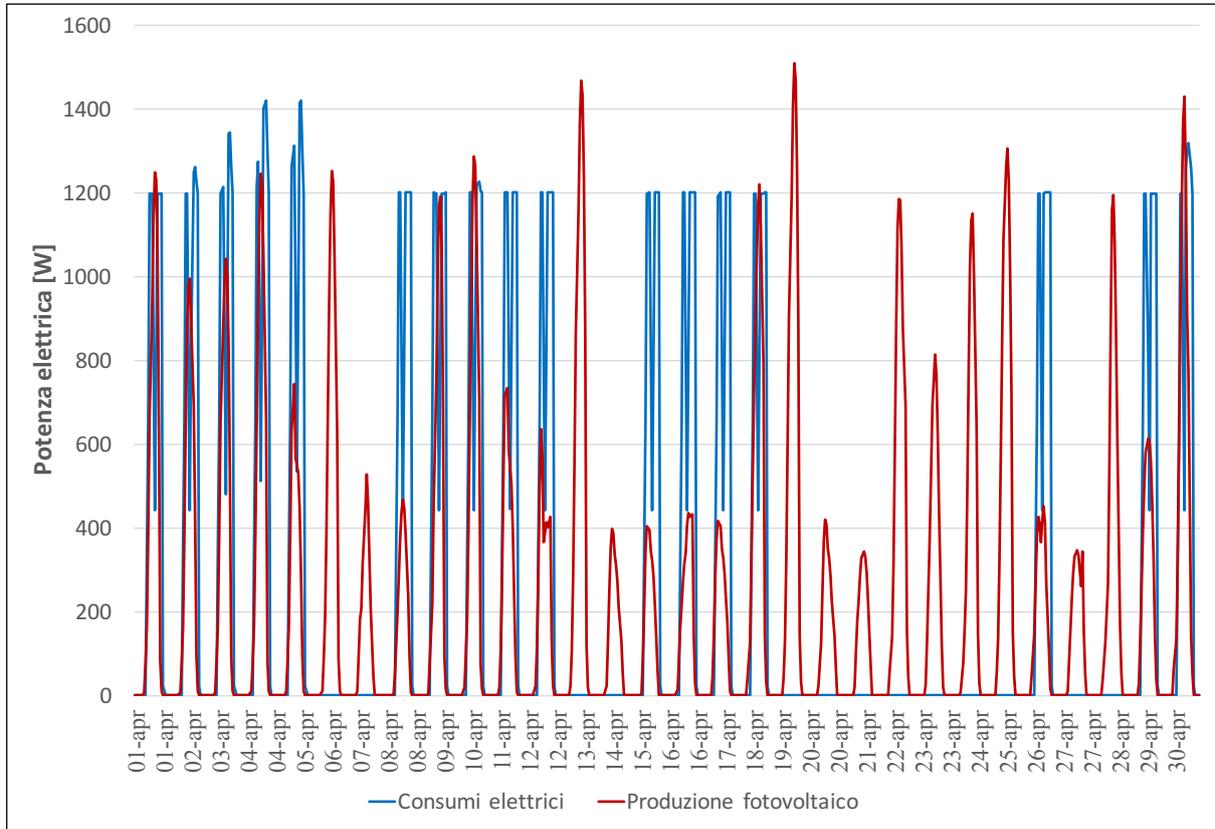


Figura 7.27: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 2 per il mese di aprile

Si presenta ora una breve analisi per l'8 e il 9 aprile, giornate caratterizzate rispettivamente da cielo coperto e sereno. Anche per queste due giornate emerge la differenza causata dall'orientamento Nord-Ovest rispetto a quello Sud-Est della Sala Studio 1. Infatti il picco di potenza per l'8, cielo coperto, è 466 W contro i 527 W, mentre il picco a cielo sereno è 1200 W per la stringa Nord-Ovest e 1400 W per la stringa Sud-Est. Come negli studi precedenti, non si riesce a ricoprire tutto il fabbisogno con la produzione di energia, nemmeno durante la giornata serena. L'autosufficienza per l'8 (cielo coperto) è del 35%, valore molto simile alla Sala Studio 1 e l'autoconsumo è leggermente più alto, 91% contro 90% perché vi è meno energia in eccesso alle 14:00. Per la giornata a cielo sereno, il 9, l'autosufficienza è pari al 57% e l'autoconsumo vale 76%. La differenza tra le due giornate è minore rispetto a gennaio, questo perché l'irraggiamento ad aprile è maggiore rispetto a quello di gennaio.

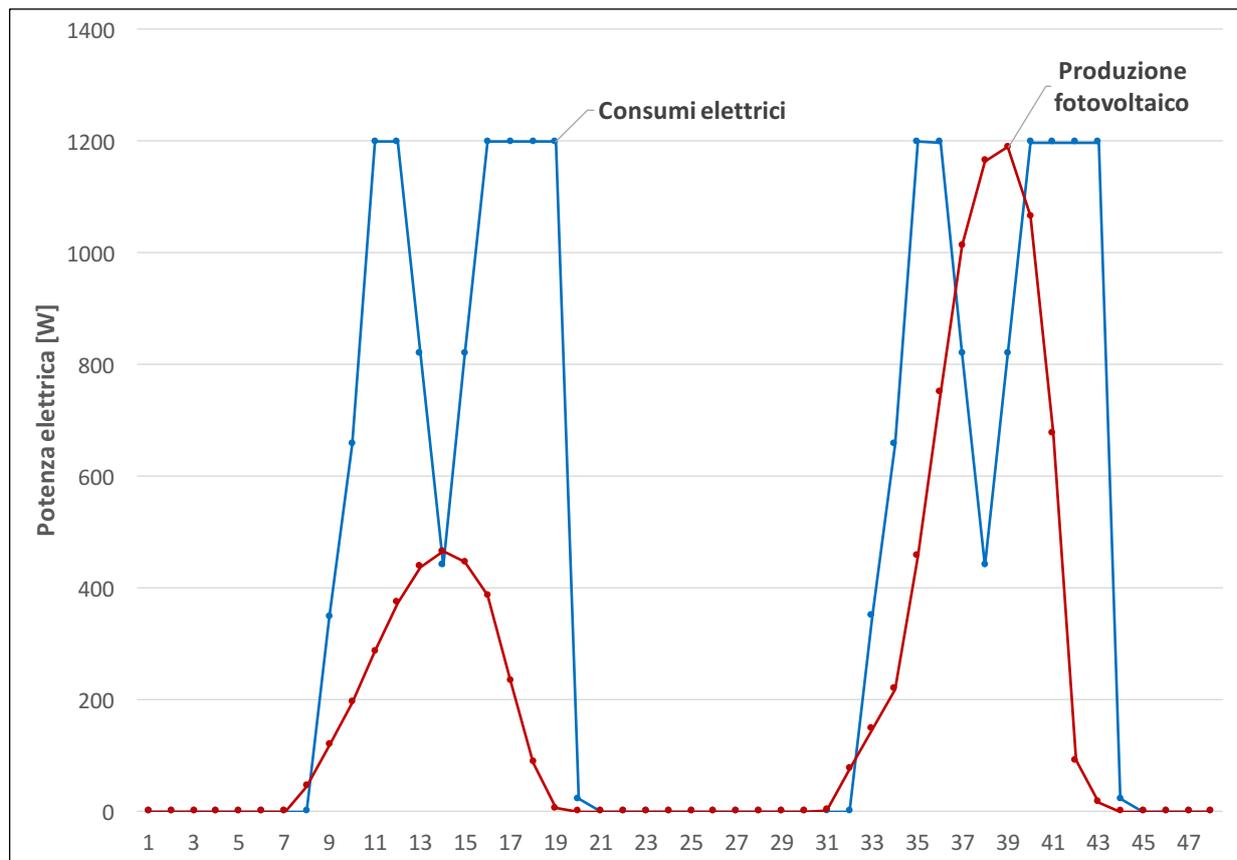


Figura 7.28: Confronto per l'8 e il 9 aprile: cielo sereno e cielo coperto per la Sala Studio 2

L'andamento della curva di generazione fotovoltaica per il 15 di luglio è molto simile al mese di aprile: la produzione è spostata verso il pomeriggio visto l'orientamento ad ovest e anche il massimo è alle 14:00 come ad aprile. Tuttavia, in questa situazione il carico elettrico è notevolmente più alto, con un picco alle 17:00 di quasi 1800 W contro i 1200 di aprile. Questa differenza è dovuta alla pompa di calore che richiede più energia elettrica nel mese di luglio per il carico di raffrescamento maggiore. A differenza della Sala Studio 1, la produzione di energia da fotovoltaico non riesce a soddisfare completamente i consumi elettrici: dalle 13:30 alle 15:00 è l'unico intervallo orario in cui non solo si riesce a coprire i consumi, ma anche a generare un surplus di energia da destinare alle batterie. Rispetto ad aprile, l'intervallo orario o e la quantità di energia in eccesso sono inferiori; tuttavia, nelle ore pomeridiane la produzione di energia è maggiore e la differenza tra la curva di carico e quella di produzione è più sottile. L'autosufficienza è pari al 69%, valore molto simile a quello della Sala Studio 1, e l'autoconsumo è del 71%; inoltre il consumo giornaliero è di 14 kWh a fronte di una produzione di 11,5 kWh. Da questi risultati si evince che è necessaria una quota aggiuntiva di energia dalle batterie o dalle altre stringhe per raggiungere la completa autosufficienza.

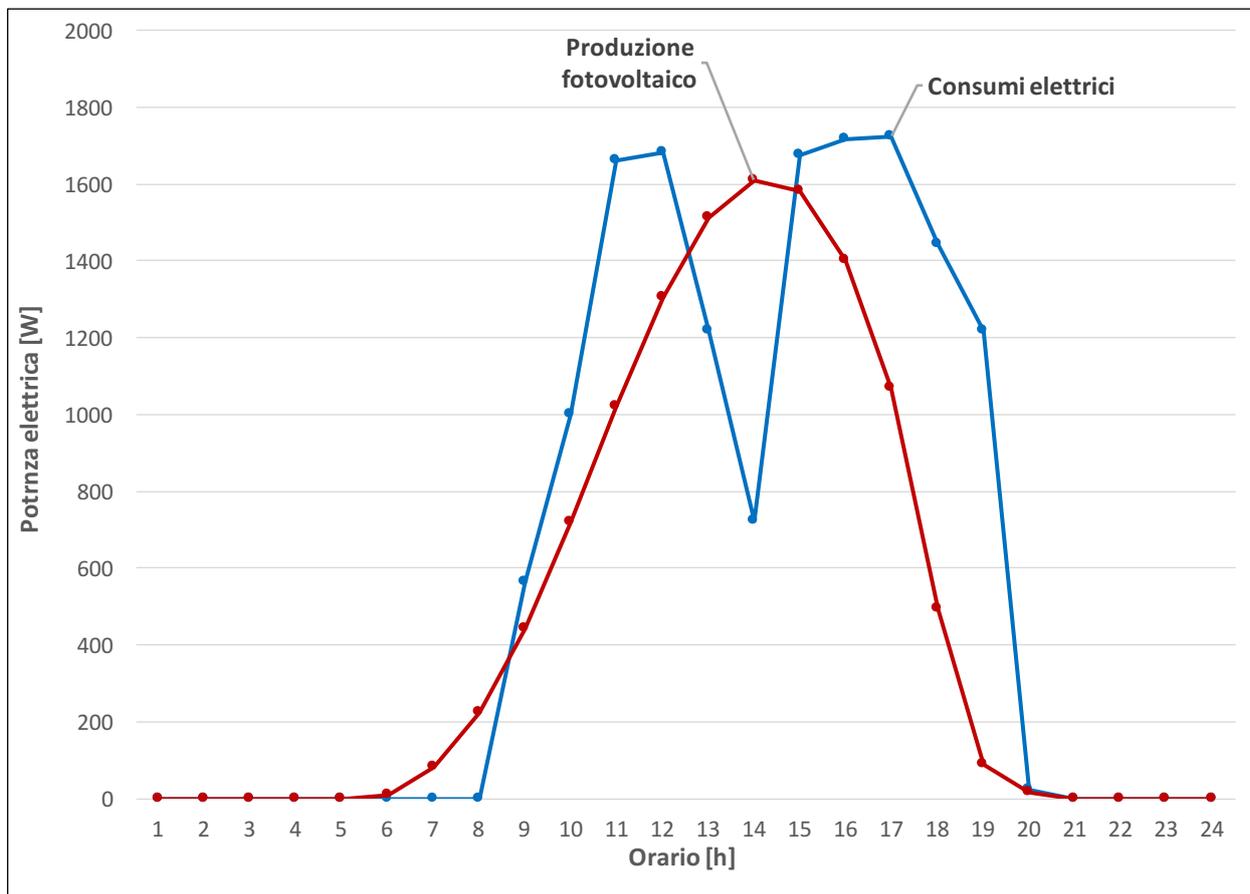


Figura 7.29: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 2 per il 15 luglio

Sempre per il mese di luglio si riporta graficamente il confronto mensile tra i carichi elettrici e la produzione da fotovoltaico per la Sala Studio 2. Nonostante luglio sia un mese caratterizzato da alte irradianze e quindi molto favorevole per il fotovoltaico, dal grafico si nota che neanche nei giorni a cielo sereno il generatore riesce a seguire la richiesta dell'utenza. I giorni dal 9 al 12 luglio sono caratterizzati da un'elevata produzione, intorno

ai 1600 W di picco, ma non è sufficiente, poiché essendo giornate soleggiate, anche la temperatura è alta e dunque i consumi della pompa di calore crescono. Il 4 e il 24 sono caratterizzati da cielo coperto, poiché si nota che la produzione è bassa, potendo contare solo sulla quota di radiazione diffusa. Per queste due giornate la produzione di energia è insufficiente, pertanto bisogna ricorrere alle batterie o alla condivisione dell'energia elettrica con le altre stringhe. Per esempio per il 24 si ha un'autosufficienza del 37% e un autoconsumo del 100% durante l'orario di apertura, ma se si considera che si ha produzione di energia già dalle 07:00 del mattino, l'autoconsumo è dell'80%.

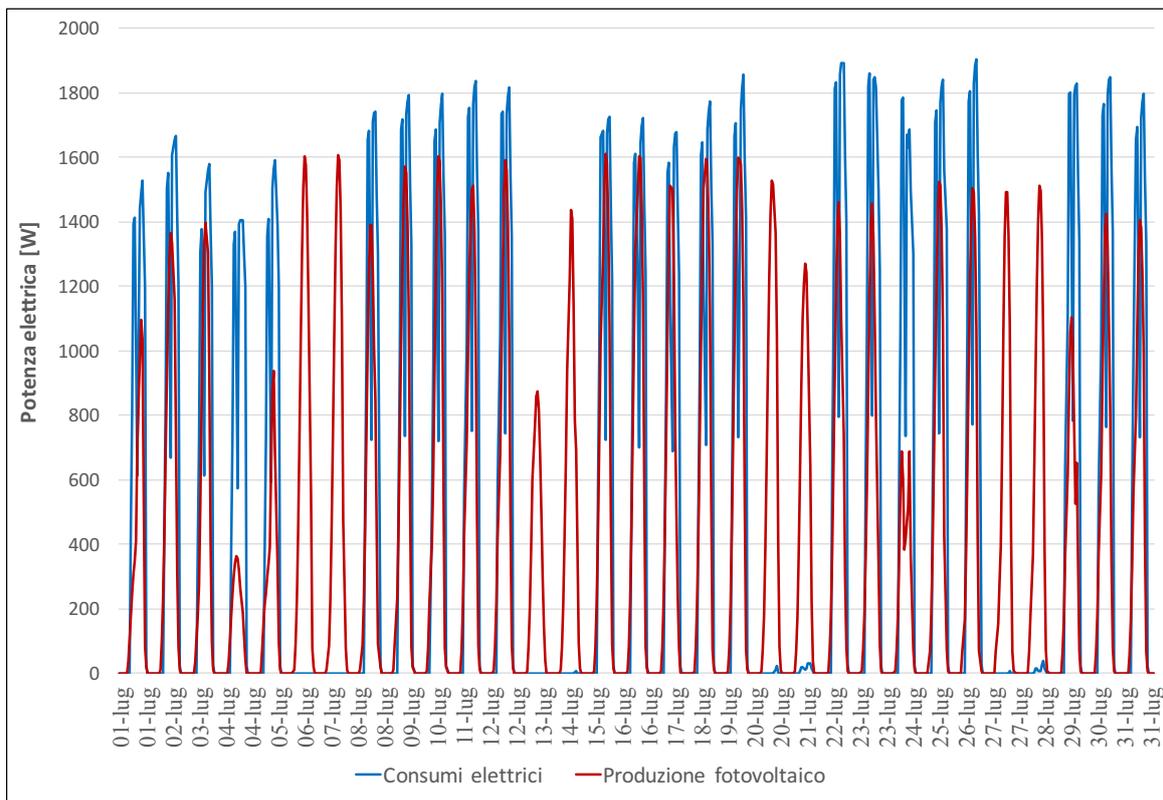


Figura 7.30: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 2 per il mese di luglio

L'ultimo giorno analizzato è il 15 ottobre. Il confronto tra il consumo elettrico giornaliero e la produzione da fotovoltaico è nettamente sfavorevole: la domanda di energia non è mai accoppiata alla produzione, anzi è sempre maggiore tranne per le ore 14:00. Essendo l'orientamento verso Ovest, il picco di potenza è spostato verso il pomeriggio, alle 14:00, quando si ha il minimo nei consumi; infatti in quell'intervallo orario si ha l'unico momento della giornata in cui la produzione supera il consumo. Nel pomeriggio è evidente la differenza tra i consumi e la produzione, tanto che è necessaria un'ingente quota di energia dalle batterie o dalle altre stringhe per poter gestire il carico. In alternativa per le ore pomeridiane si potrebbe ridurre l'orario di apertura per evitare di ritrovarsi con ore in cui non si abbia la copertura di energia. L'autosufficienza per questa giornata è solo del 36%, con un autoconsumo del 96% se si considera l'orario di apertura, ma se si considera che la produzione da fotovoltaica registra valori già delle 07:00 si ha un autoconsumo dell'87%. Tutta l'energia prodotta viene immediatamente consumata, tranne per la piccola quota in eccesso dalle 13:30 alle 14:30. La stessa tendenza si osserva nel confronto mensile tra i consumi elettrici e la produzione di energia. Risulta un disallineamento per ogni giorno

del mese e il generatore non è mai in grado di coprire i consumi, a differenza del generatore della Sala Studio 1 dove consumi e produzione sono più allineati.

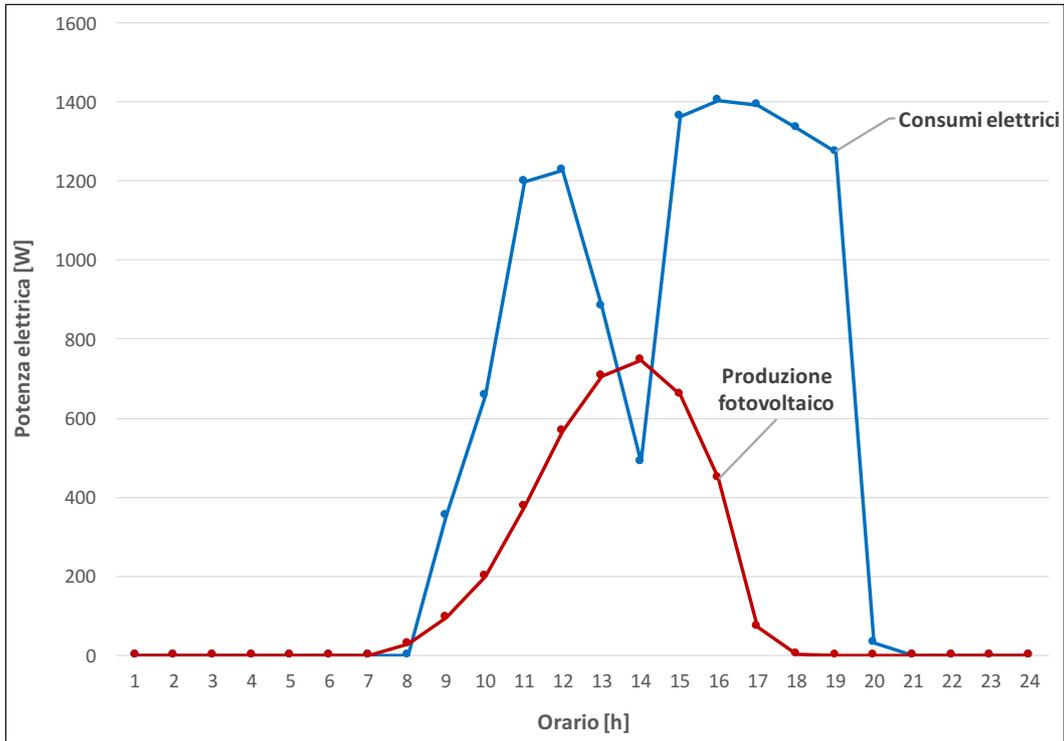


Figura 7.31: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 2 per il 15 ottobre

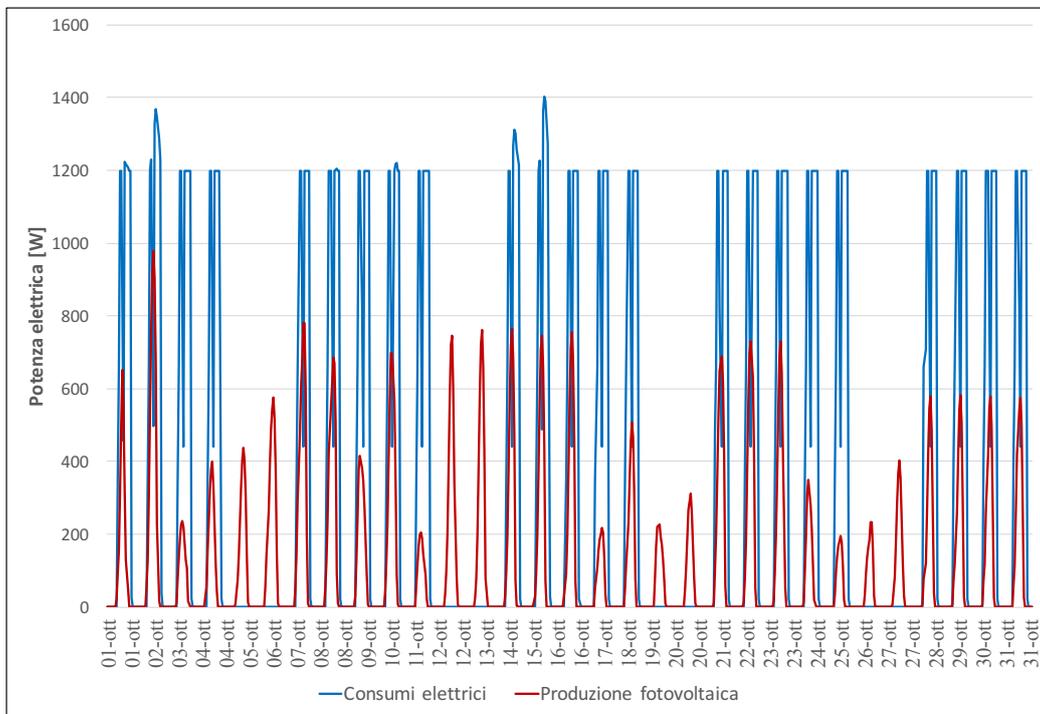


Figura 7.32: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici della Sala Studio 2 per il mese di ottobre

Come per la Sala Studio 1, si riportano prima in forma tabellare, poi sotto forma di grafico il confronto tra la produzione fotovoltaica e il consumo elettrico della Sala Studio 2 per ogni mese dell'anno. Si nota che i consumi elettrici sono per le due aule sono i medesimi, la più grande differenza è costituita dal generatore fotovoltaico. Il generatore sopra la Sala Studio 2 è orientato Nord-Ovest, quindi è quello più sfavorevole dal punto di vista energetico. Infatti solo per il mese di giugno si ottiene che la produzione supera il consumo, viceversa per il mese di luglio il consumo supera sovrasta la produzione.

Tabella 7.3: Analisi dei consumi e della produzione per la Sala Studio 2

	E cons kWh	E fot kWh	AS %	AC %
Gennaio	256	44	15	99
Febbraio	245	76	26	98
Marzo	230	128	39	89
Aprile	179	171	52	81
Maggio	273	241	65	72
Giugno	254	263	61	76
Luglio	337	297	60	74
Agosto	0	243	100	0
Settembre	260	148	40	85
Ottobre	248	88	31	90
Novembre	248	51	17	94
Dicembre	225	36	11	100
Annuale	2760	1794	43	79

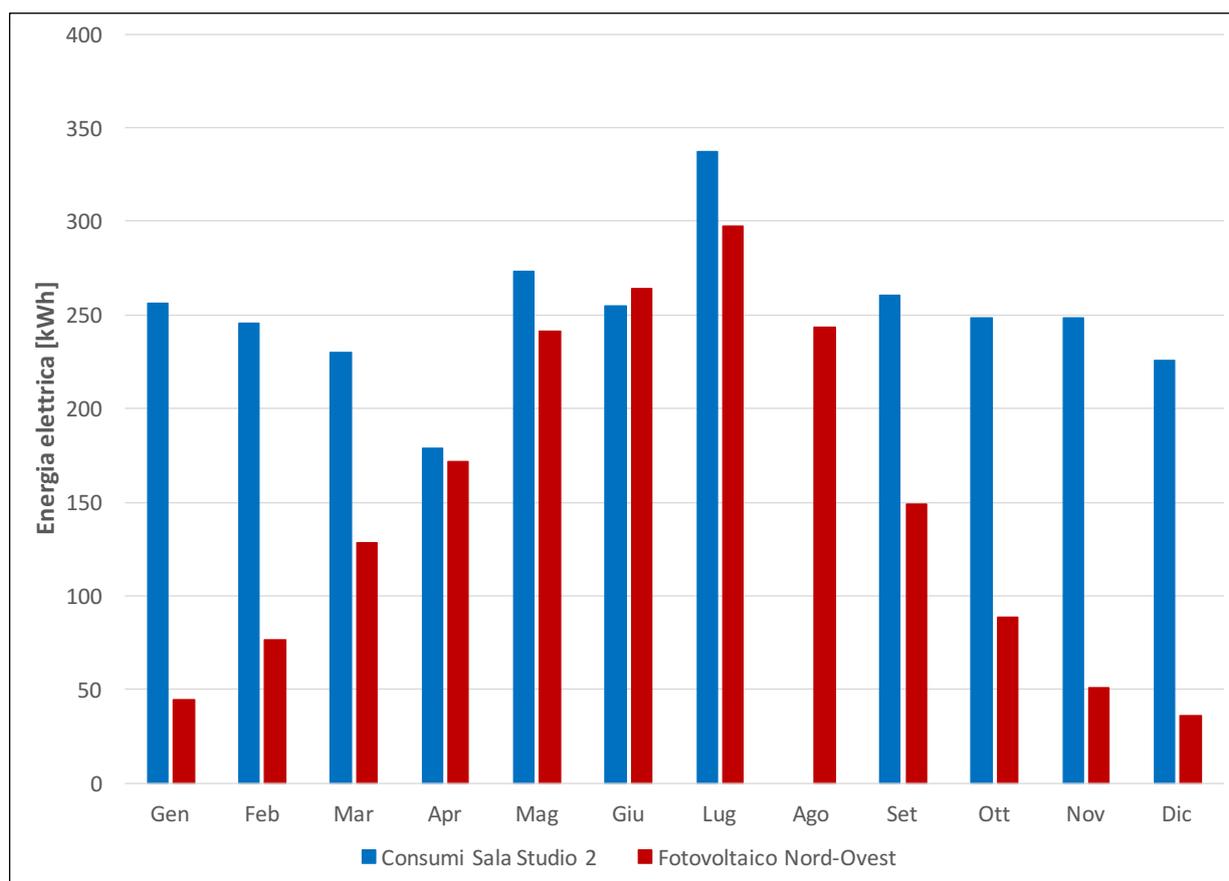


Figura 7.33: Analisi elettrica per la Sala Studio 2

Come era già intuibile dal precedente grafico ad istogrammi, l'autosufficienza della Sala Studio 2 è simile a quella per l'aula studio 1 anche se minore, il massimo si ha per maggio con il 65%, nemmeno per i mesi con alto irraggiamento. I valori sono globalmente meno elevati rispetto a quelli della Sala Studio 1 e questo è dovuto sia all'orientamento poco favorevole della stringa sia per la presenza più ingente dell'ombreggiatura dovuta alla parete dei I3P. Per dicembre e gennaio l'autosufficienza è decisamente bassa, attestandosi rispettivamente a 15 e 11 %, a cui corrispondono elevati autoconsumi, tanto da avere il 100% per Dicembre, infatti tutta l'energia prodotta è subito impiegata. Per questi due mesi bisognerebbe analizzare nel dettaglio se l'accumulo e l'interscambio di energia sono sufficienti a garantire la copertura del fabbisogno elettrico. I valori di autoconsumo sono per ogni mese maggiori rispetto alla Sala Studio 1, il che implica che la gran parte dell'energia prodotta è immediatamente impiegata per coprire il carico elettrico.

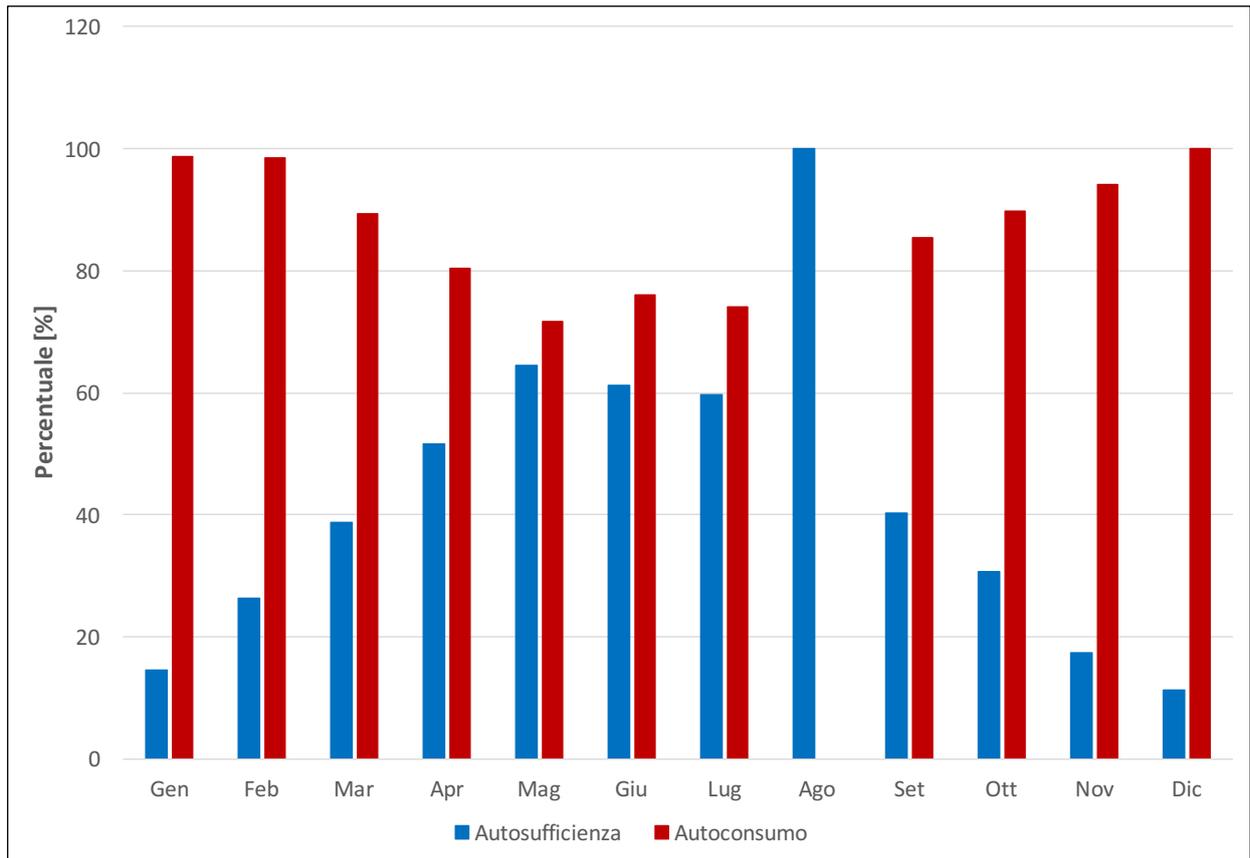


Figura 7.34: Valori ai Autosufficienza e Autoconsumo per la Sala Studio 2

7.2.3 Analisi della Sala Controllo e del Locale Tecnico

Il terzo generatore è costituito dalle stringhe Sud-Ovest e Nord-Est che sono posizionate rispettivamente sopra la Sala Controllo e il Locale Tecnico. I due locali hanno dimensioni minori rispetto alle due sale studio, inoltre solo la Sala Controllo è occupata da tre persone mentre il Locale Tecnico è sede delle apparecchiature: inverter e batterie. La trattazione considera come consumo elettrico la somma dei consumi delle singole zone e l'energia totale fornita dal generatore fotovoltaico è la somma dell'energia delle singole stringhe. Tenuto conto di queste considerazioni, ci si aspetta che la produzione di energia del generatore sia molto maggiore rispetto ai consumi elettrici delle due zone: il consumo elettrico annuale si attesta pari a 949 kWh/anno e la produzione annuale da fotovoltaico pari a 4406 kWh/anno. Già da questi risultati è evidente la quantità di energia in eccesso che sarà indirizzata alle batterie o scambiata con le altre zone se sono in condizione di deficit di energia. Bisogna considerare che il generatore fotovoltaico in questo caso è costituito dalla stringa che produce più energia annuale, quella Sud-Ovest, pertanto ci si aspetta che i carichi siano per lo più soddisfatti.

Il primo giorno analizzato è il 15 gennaio a cui seguirà l'analisi mensile. Il grafico mostra come le ipotesi appena formulate trovino riscontro nei dati: la produzione di energia da fotovoltaico è nettamente maggiore per tutte le ore rispetto ai consumi elettrici. Dalle 09:30 alle 16:10 circa l'intero fabbisogno elettrico è ricoperto dal generatore; le uniche ore scoperte sono la fascia 08:00-09:00 e dalle 18: 19:00. Si tratta degli orari durante i quali, in inverno, la radiazione solare è assente, pertanto non si può avere produzione di energia. Rispetto alle due sale studio la situazione è molto favorevole, tanto da raggiungere un autoconsumo del 60 % e un'autosufficienza dell'86 %. Si potrebbe aumentare l'autosufficienza limitando l'orario di apertura nel pomeriggio fino alle 16:30 in modo da accoppiare perfettamente la produzione da fotovoltaico e i consumi.

Anche dall'analisi mensile è possibile vedere che nella maggior parte delle giornate si ha energia prodotta in eccesso e il carico elettrico è sempre soddisfatto, escluse le ore serali. Questa tendenza appena descritta è valida per i giorni a cielo sereno, viceversa per i giorni a cielo coperto la produzione non è sufficiente a ricoprire l'intero fabbisogno dei due locali. Rispetto alle due sale studio, si riesce a provvedere in modo più completo al fabbisogno di energia dei due locali, tuttavia l'energia in eccesso rappresenta una grossa che va sfruttata: per esempio per l'11 e il 15 gennaio i consumi rappresentano un terzo dell'energia totale prodotta; la quota in surplus è stoccata nelle batterie per provvedere alla mancanza di luce nelle ore solari oppure reindirizzata agli altri locali.

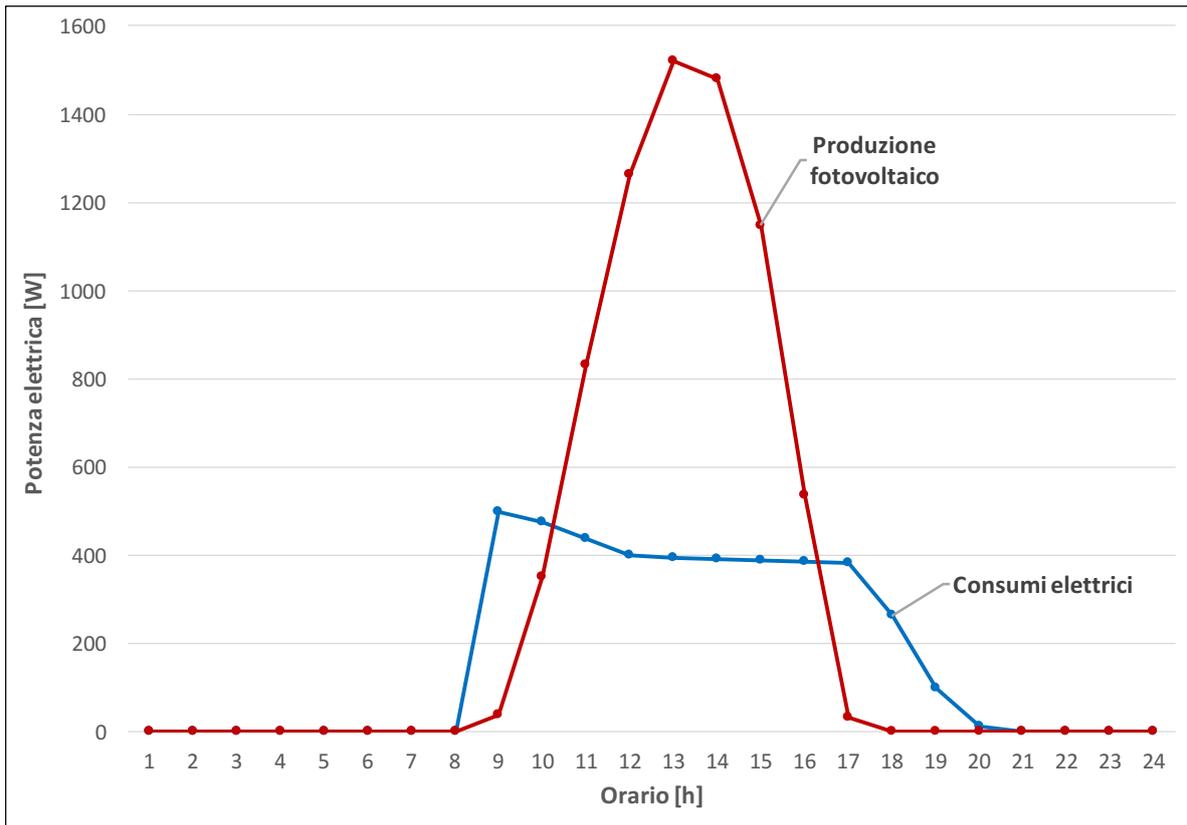


Figura 7.35: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il 15 gennaio

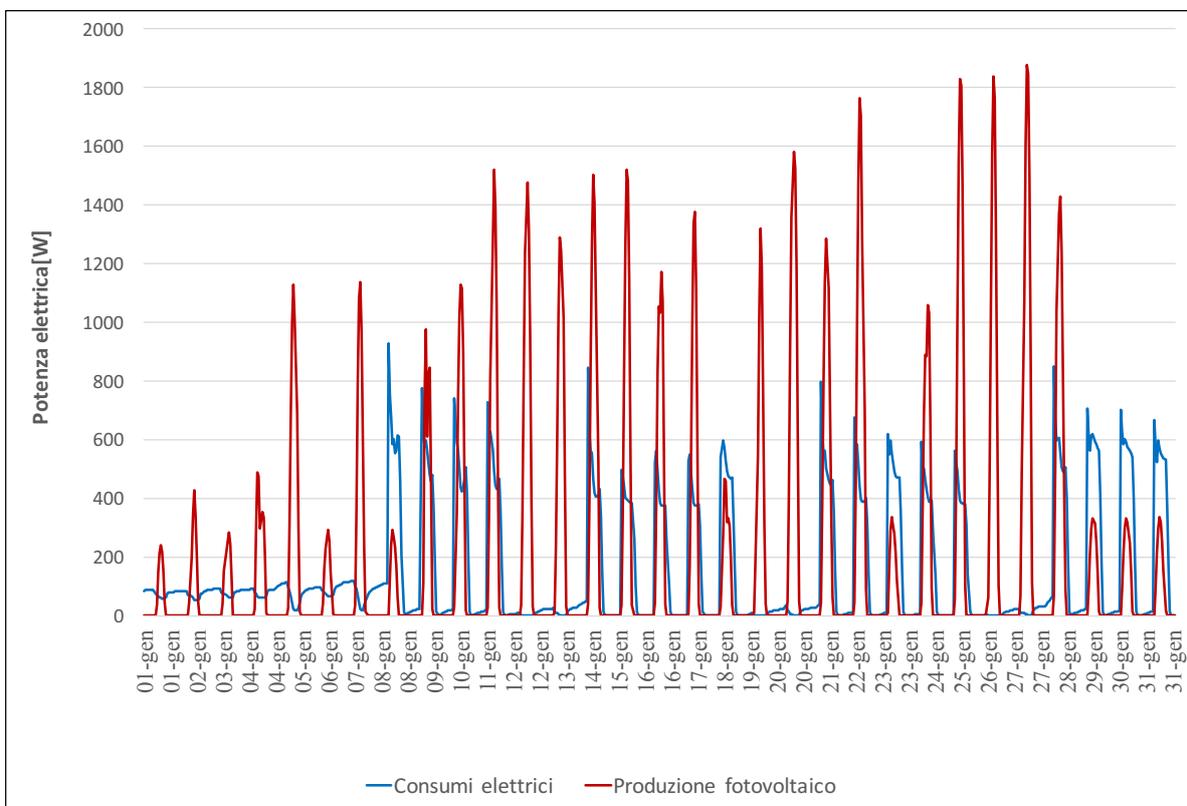


Figura 7.36: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il mese di gennaio

Il secondo giorno analizzato è il 10 aprile. È un giorno a cielo sereno pertanto la produzione del generatore è molto elevata, tanto da rilevare un valore di picco di 3200 W alle ore 13:00. In questa giornata la produzione di energia registra un notevole surplus rispetto al consumo elettrico il cui picco si ha alle 17:00 per 400 W. L'unico orario in cui si ha il consumo leggermente maggiore che la produzione è alle 18:00, quando ormai la radiazione solare è esigua. Il valore dell'autosufficienza è estremamente elevato, pari al 98,2 %, viceversa l'autoconsumo è ridotto e pari al 30 %, in quanto solo una ridotta parte dell'energia prodotta è effettivamente utilizzata. In una giornata di questo tipo, conviene sfruttare lo scambio di energia attraverso le zone in modo da soddisfare il carico elettrico per tutte le zone. Confrontando i risultati di questo caso con i precedenti, si può notare che se si scambia l'energia elettrica tra le zone, si è in grado di soddisfare il fabbisogno della Sala Studio 2 in deficit al mattino e al contempo accumulare energia nelle batterie da usare nelle ore serali per le due aule studio.

Dall'analisi mensile emerge che il carico elettrico è sempre soddisfatto dalla produzione sia per giornate a cielo sereno sia per quelle a cielo coperto. I primi giorni di aprile presentano dei consumi irrilevanti rispetto alla produzione, la gran parte dell'energia è in eccesso: per esempio per il primo gennaio si ha una produzione di 20 kWh a fronte di un consumo di appena 3,7 kWh, infatti il valore di autosufficienza è pari al 94,5 % e l'autoconsumo del 28%. Il 15,16 e 17 di aprile sono giorni a cielo coperto ma anche per essi i consumi sono per la maggior parte coperti dalle due stringhe: per esempio per il 15 aprile si ha un'autosufficienza del 93 % e un autoconsumo del 52 %, maggiore rispetto al caso precedente perché l'energia prodotta è minore.

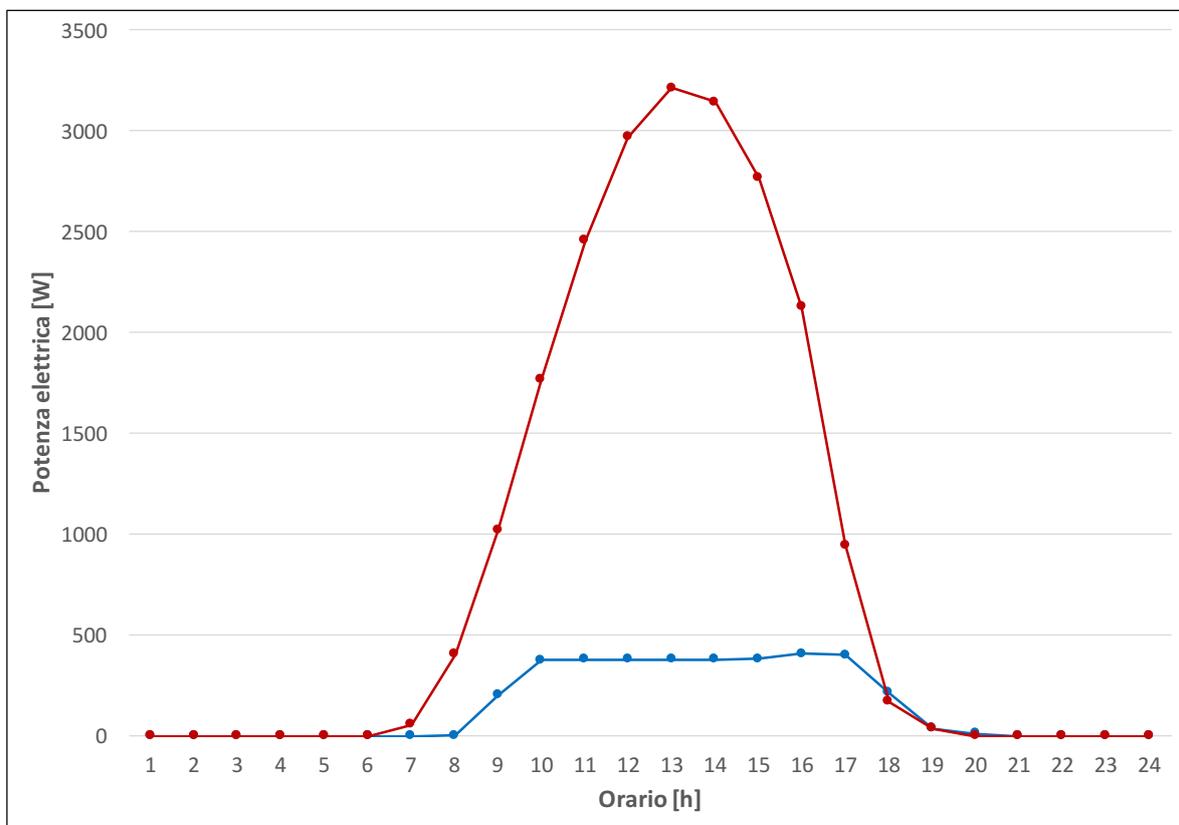


Figura 7.37: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il 10 aprile

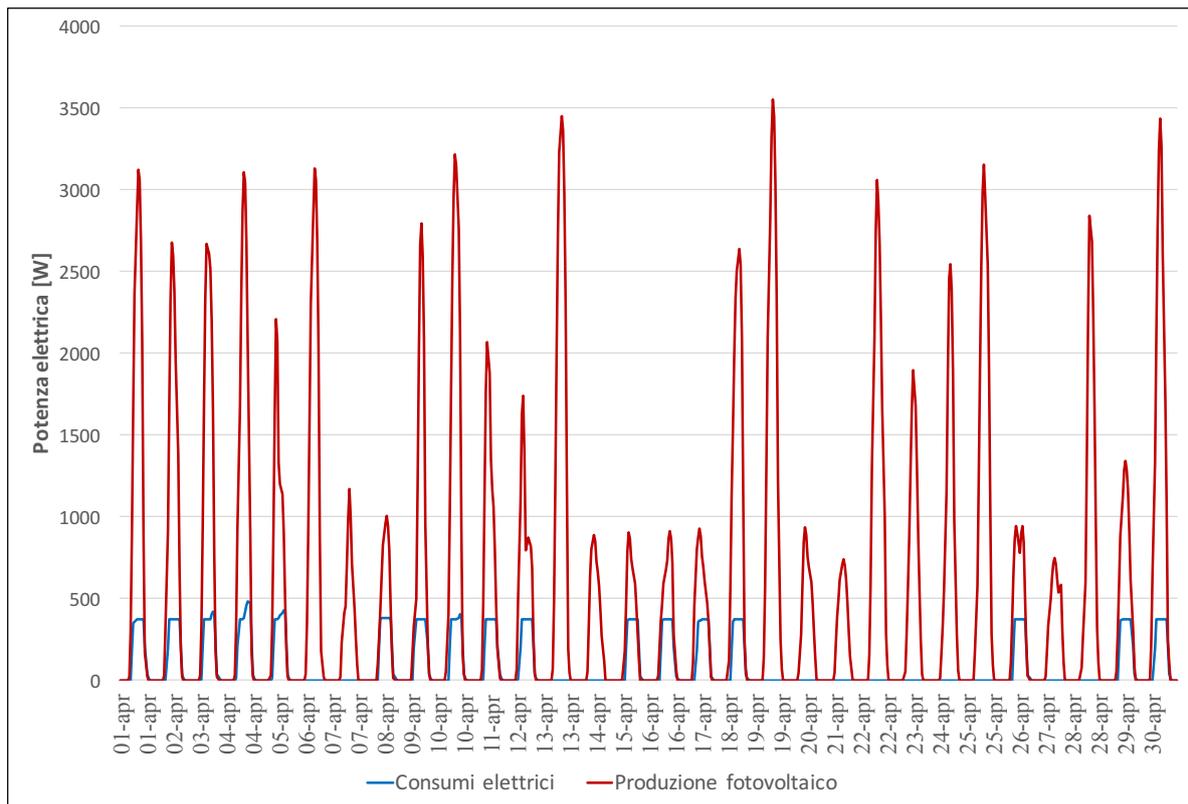


Figura 7.38: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il mese di aprile

La stessa tendenza si nota per il 15 luglio e in generale per tutto il mese. I consumi elettrici sono per ogni ora del giorno inferiori all'energia prodotta dal generatore. I consumi sono anche maggiori rispetto ad aprile per la maggiore incidenza della pompa di calore per il raffrescamento, ma anche l'energia prodotta è maggiore. Dal grafico è evidente una quota notevole di energia in eccesso: il carico elettrico giornaliero è pari a 5,3 kWh, maggiore rispetto ai circa 3,7 di aprile, mentre l'energia prodotta il 15 luglio è pari a 25,7 kWh, quindi quasi 5 volte maggiore. Questa differenza si traduce in un valore di autosufficienza pari al 100 %, quindi in questa giornata la Sala Controllo e il Locale Tecnico vedono il loro fabbisogno elettrico completamente soddisfatto dalla produzione fotovoltaica. L'autoconsumo è pari al 20%, un valore basso perché la gran parte dell'energia è in eccesso e non viene consumata direttamente dai due locali, ma è stoccata oppure scambiata con gli altri locali. Si tratta del primo caso tra tutti quelli analizzati in cui l'autosufficienza raggiunge valori del 100 %. Questo è dovuto, come già detto, all'orientamento favorevole della stringa Sud-Ovest e ai bassi consumi associati ai due locali in esame rispetto ai consumi delle due aule studio.

Se si analizza il grafico con gli andamenti mensili, è evidente che per tutte le giornate di luglio il consumo elettrico è bilanciato perfettamente dalla produzione fotovoltaica. Questo si verifica sia per le giornate a cielo sereno sia per quelle a cielo coperto. Il 4 luglio rientra nel secondo caso e, pur essendo caratterizzato da una bassa producibilità, essa è comunque sufficiente a soddisfare il carico elettrico. Infatti si sono calcolati i valori di autosufficienza e autoconsumi pari rispettivamente a 98 % e al 58%: non è autosufficienza completa perché nelle ore serali il generatore non copre interamente il carico, ma la quota scoperta è minima rispetto ad altri casi. Le restanti giornate mostrano come l'energia in eccesso sia considerevole e debba quindi essere gestita in modo intelligente.

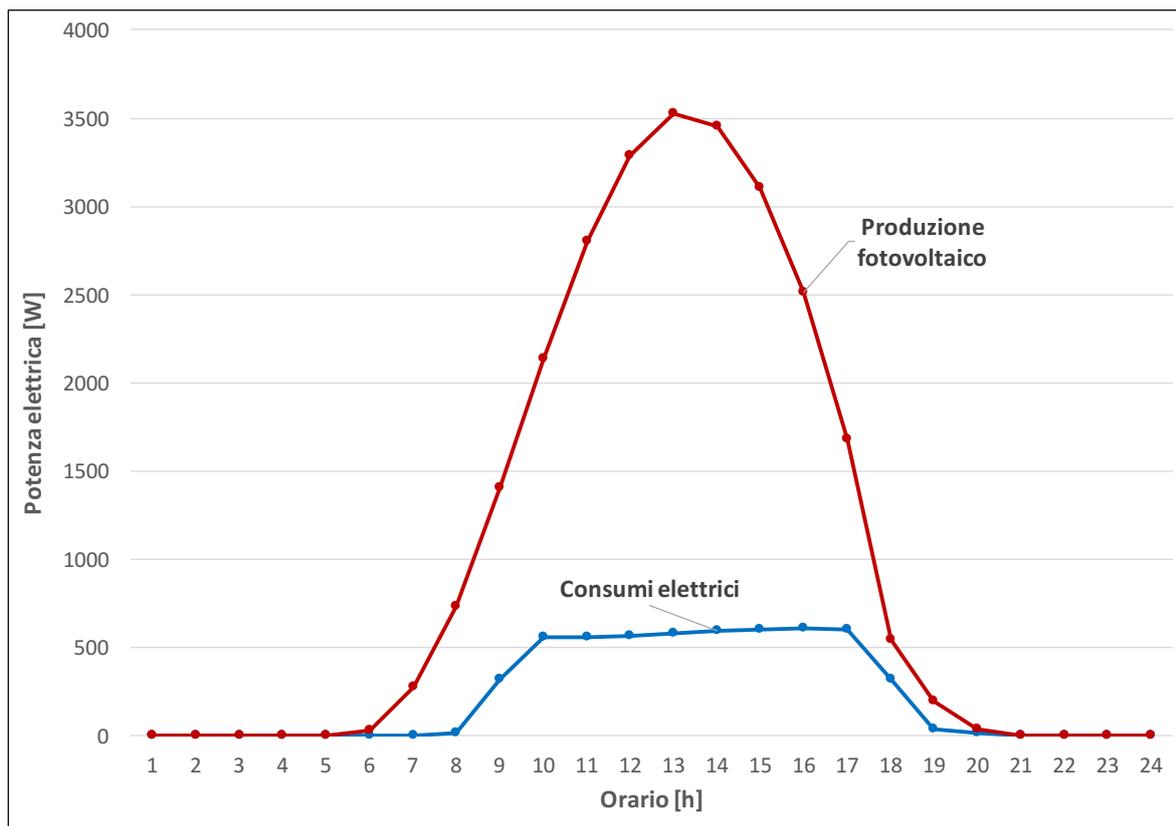


Figura 7.39: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il 15 luglio

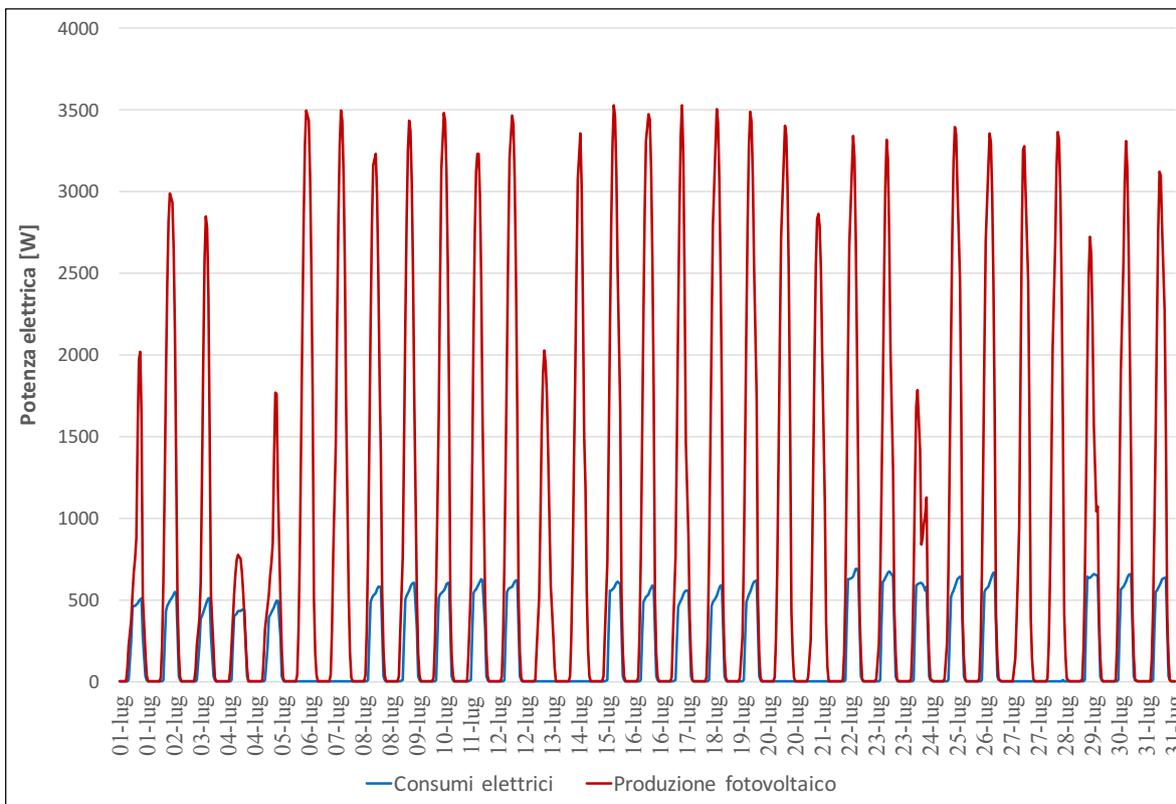


Figura 7.40: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il mese di luglio

L'ultimo giorno analizzato è il 15 ottobre. Anche per questa giornata si nota come l'energia prodotta sia molto più elevata di quella consumata dai carichi elettrici. Si nota anche che la curva di carico ha un minimo alle ore 14:00 che può essere dovuto ad un'interruzione dell'impianto di raffrescamento poiché la temperatura nelle zone è già al di sotto dei 26°C impostati come setpoint. Il valore giornaliero dei consumi è pari a 3,3 kWh, valore simile ad una giornata di aprile, mentre l'energia prodotta è pari a 12 kWh quindi quasi 4 volte superiore. Gli altri dati di interesse riguardano l'autosufficienza pari a 84,7 % e l'autoconsumi pari a 12,1 %. Il primo valore non raggiunge il 100 % perché, essendo un giorno autunnale, la produzione di energia si arresta alle 17:00, mentre la Sala Controllo è aperta fino alle 19:00. Quindi in quelle due ore serali 17:00-19:00 i consumi dei due Locali Tecnici non sono immediatamente coperti dalle stringhe ma tramite l'energia accumulata nelle batterie durante la giornata. Infatti, come per aprile e luglio, è possibile accumulare grosse quantità di energia durante le ore centrali della giornata quando il surplus è elevato.

Per quanto riguarda l'andamento mensile si osserva che in questo caso, per i giorni del 3, 11 e 18, l'incidenza della riduzione a causa del cielo coperto è maggiore. Se si considera il 3 ottobre la quota di autosufficienza è pari all' 81 % e l'autoconsumo è anch'esso 81 %. Questo implica che tutta l'energia che viene prodotta dal generatore è immediatamente utilizzata per soddisfare il fabbisogno elettrico dei due locali e non si genera energia in eccesso da accumulare. Il disaccoppiamento tra produzione e consumo è concentrato sempre nelle ore serali, quindi se non vi è energia accumulata nelle batterie, bisognerebbe pensare ad una possibile riduzione dell'utilizzo della Sala Controllo dalle 19:00 alle 17:00, quando vi è ancora disponibilità di luce solare. Viceversa per le giornate a cielo sereno come il 23, si hanno valori elevati di autosufficienza pari al 91 % e bassi di autoconsumo del 35 %: il fabbisogno è quasi interamente coperto dal generatore e una ingente quota è destinata all'accumulo.

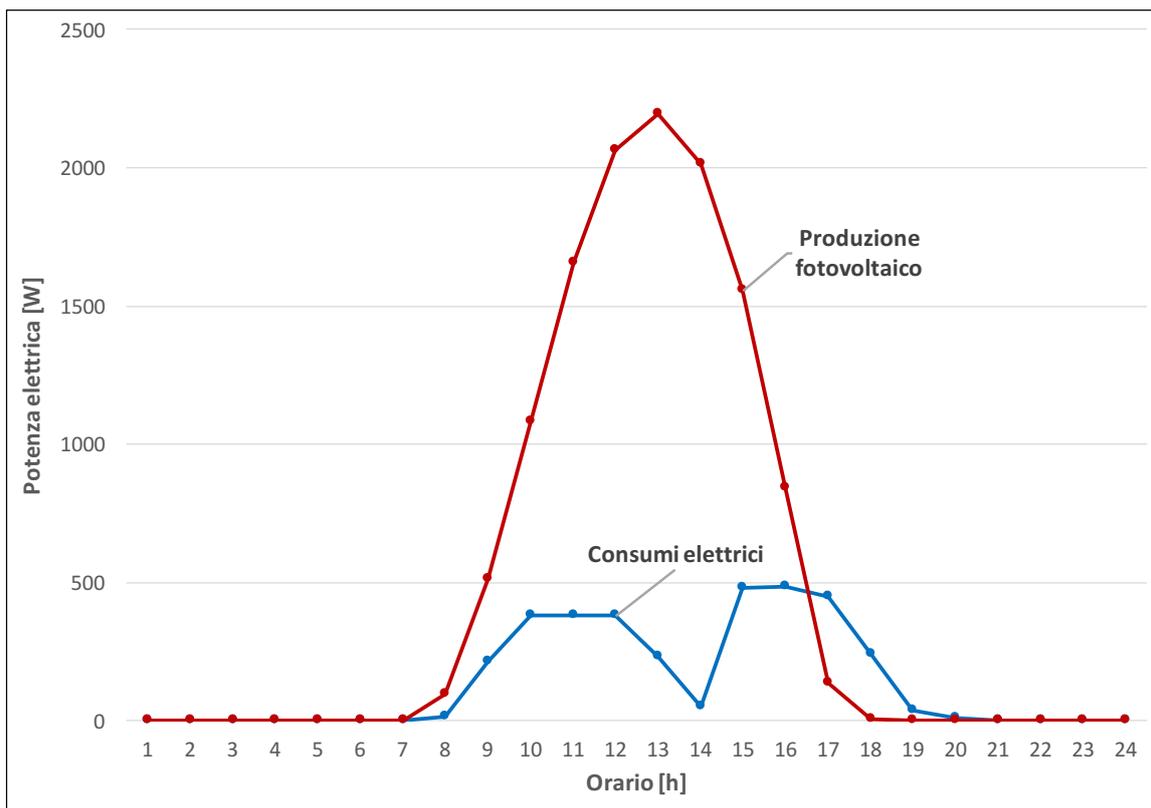


Figura 7.41: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il 15 ottobre

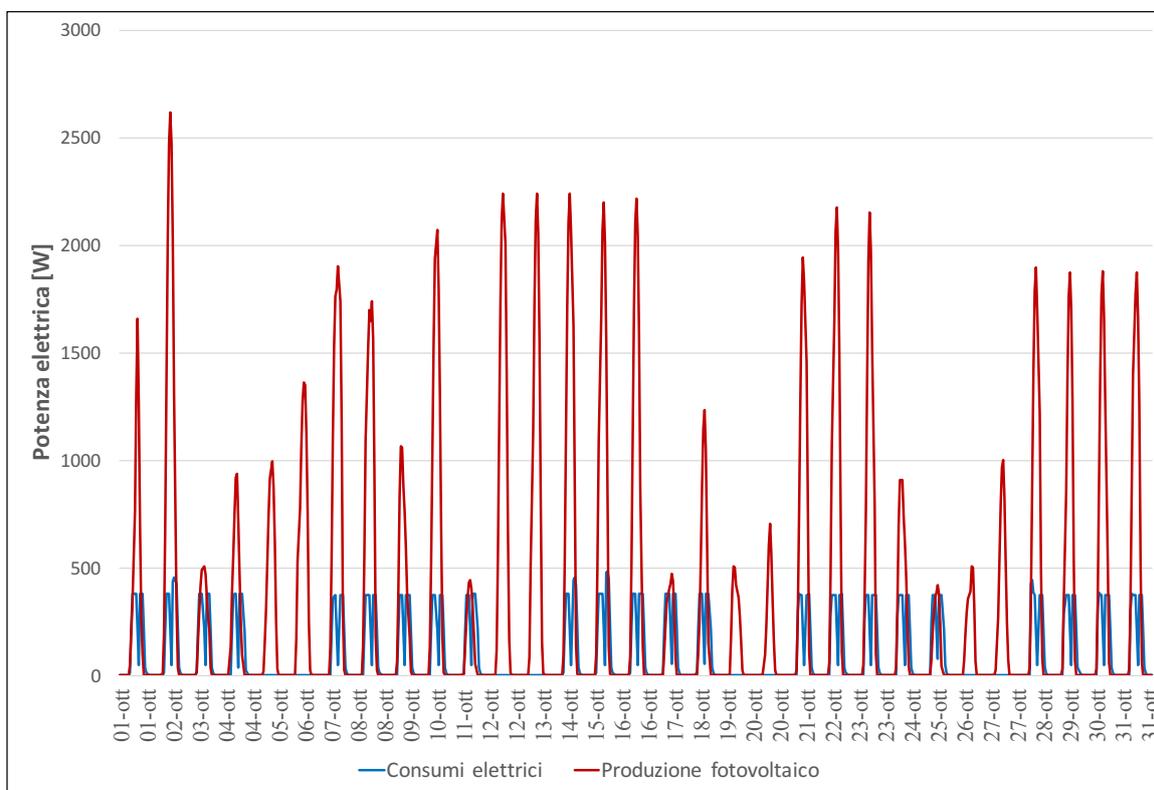


Figura 7.42: Confronto tra fotovoltaico e consumi elettrici per il mese di ottobre

Infine si riporta il confronto tra i consumi e la produzione di energia. La Sala Controllo e il Locale Tecnico presentano le condizioni più favorevoli, infatti l'energia erogata dal generatore è sempre maggiore che il carico elettrico. Anche per gennaio e dicembre che sono notoriamente i mesi più in difficoltà, per il basso irraggiamento, si ha il perfetto accoppiamento tra produzione e consumi, con addirittura energia in eccesso. Da aprile e luglio l'energia prodotta arriva ad essere 7 volte in più rispetto ai consumi. Questo aspetto è molto importante perché l'energia in eccesso è indirizzata o alle batterie o direttamente alle aule studio per coprire il fabbisogno istantaneo di energia.

Tabella 7.4: Analisi dei consumi e della produzione per la Sala Studio 2

	E cons kWh	E fot kWh	AS %	AC %
Gennaio	110	152	47	79
Febbraio	96	225	65	67
Marzo	82	337	80	56
Aprile	60	416	97	37
Maggio	87	540	100	27
Giugno	82	580	100	27
Luglio	118	664	100	27
Agosto	0	574	100	0
Settembre	72	376	85	45
Ottobre	70	252	73	49
Novembre	82	164	55	67
Dicembre	88	124	45	77
Annuale	949	4047	79	46

L'ultimo grafico ad istogrammi mostra il confronto tra l'autosufficienza e l'autoconsumo. E' il primo caso dove si riesce a raggiungere l'autosufficienza del 100% nei mesi di maggio giugno e luglio, questo implica che la Sala Controllo e il Locale Tecnico non hanno bisogno di ulteriore forme di energia per il sostentamento all'infuori del fotovoltaico. Anche per i mesi di gennaio e dicembre i risultati sono più ottimisti: per il primo si raggiunge un'autosufficienza del 47%, più del doppio rispetto alle due sale studio; per dicembre si arriva al 45%, un valore in linea con le aspettative e comunque più ottimista rispetto gli altri locali.

L'autoconsumo da maggio a luglio è basso, quindi si riesce ad ottenere la piena autosufficienza con un elevato eccesso di energia, poiché la quota consumata sul posto per soddisfare il carico dei due locali è esigua. La quota in eccesso è indirizzata alle batterie oppure alle altre sale studio: per esempio si potrebbe aumentare considerevolmente l'autosufficienza della Sala Studio 2 ad un valore più consono.

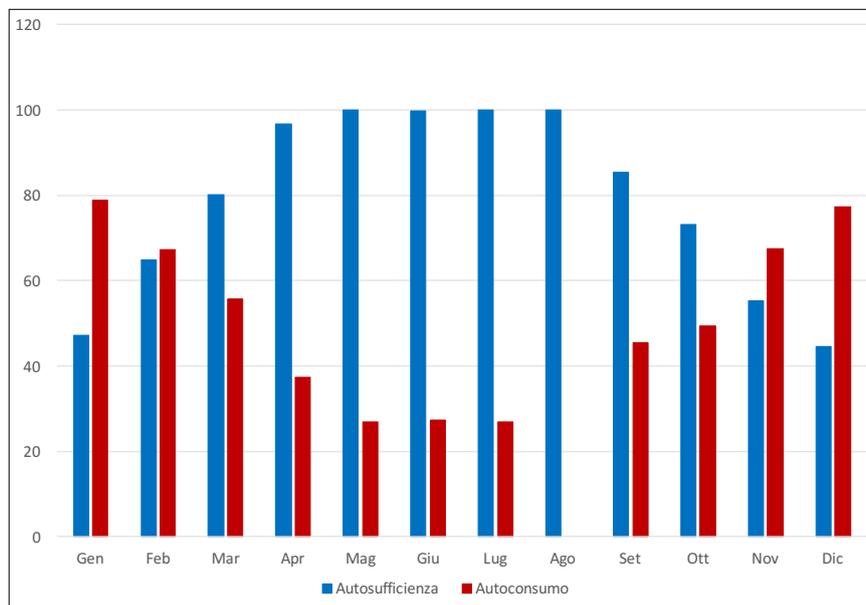


Figura 7.43: Valori di Autosufficienza e Autoconsumo per la Sala Controllo e il Locale Tecnico

Conclusioni

Il lavoro di tesi aveva l'obiettivo di calcolare i carichi termici ed elettrici per tutti e locali del modulo abitativo che si fonda sul progetto *eco-home*. Rispetto al modulo originario si è rivista la stratigrafia, coibentando con l'isolante sughero tostato, in modo da rispettare gli standard espressi dal *Passivhaus Institute*: la trasmittanza termica del componente opaca è minore del limite di riferimento, mentre quella per il componente vetrato è superiore. Bisognerebbe optare per una classe di serramenti migliori con un coefficiente di trasmissione di energia solare maggiore di 0,2 scelto in modo che in inverno si sfruttino maggiormente gli apporti gratuiti. Inoltre si potrebbe sostituire l'aria nell'intercapedine con Argon o Krypton per diminuire ulteriormente la trasmittanza termica poiché sono caratterizzati da conducibilità termica inferiore.

Dai risultati dell'analisi termoenergetica si è osservato come i consumi delle due aule studio siano pressoché i medesimi, quindi l'obiettivo iniziale è stato soddisfatto. Le due sale gemelle sono la fonte più energivora, mentre i consumi del Locale Tecnico sono trascurabili rispetto agli altri ambienti. Infatti il fabbisogno termico annuo specifico per il riscaldamento delle due aule studio è di $6,3 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$, contro i $3,01 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$ della Sala Controllo e i $0,93 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$ del Locale Tecnico. Le stesse considerazioni valgono per il fabbisogno termico annuo specifico per raffrescamento, con i $5 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$ delle due sale studio contro i $1,74$ e $0,3 \text{ kWh}/(m^2 \text{ y})$ rispettivamente della Sala Controllo e del Locale Tecnico. Rispetto al caso analizzato da Chiara Galleri nel suo studio di tesi, si è riuscito a ridurre notevolmente il fabbisogno annuo specifico sia per riscaldamento sia per raffrescamento, raggiungendo rispettivamente i valori di $14,82 \text{ kWh}/m^2/\text{anno}$ e $14,59 \text{ kWh}/m^2/\text{anno}$. Questi valori sono inferiori ai $15 \text{ kWh}/m^2/\text{anno}$ imposti dallo *standard Passivhaus*. L'analisi è stata condotta con delle ipotesi che si sono illustrate nel corso della tesi, quindi tali valori sono da riferire solamente in base alle ipotesi fatte.

L'ultima analisi riguarda i carichi elettrici. Anche in questo caso, non essendo ancora definite le specifiche della pompa di calore, si è ipotizzato il valore di COP pari a 3 per la stagione invernale e a 3,5 per quella estiva. Si tratta di valori piuttosto bassi per un edificio che punta ad essere riconosciuto come una casa passiva e che deve minimizzare i consumi. Tuttavia, rispetto al caso di Chiara Galleri, la pompa di calore ha un'incidenza decisamente minore sui consumi elettrici e questa è la prova della buona riuscita della coibentazione. La quota di consumi elettrici maggiore è associata ai computer per cui si è ipotizzato un consumo di $90 \text{ W}/\text{persona}$. L'ipotesi più forte è stata fatta per le luci: l'impianto è stato solo abbozzato per avere un'idea dei consumi, ma servirebbe uno studio meticoloso utilizzando programmi di calcolo appositi per la progettazione elettrica (es. *DiaLux*).

Infine si sono valutati i valori di autosufficienza e autoconsumo per Sala Studio 1, Sala Studio 2 e l'insieme di Sala Controllo e Locale Tecnico utilizzando l'impianto fotovoltaico descritto nella tesi. L'idea di progetto è stata di collocare 4 stringhe di uguale potenza nominale, 2160 W , una per ogni lato dell'edificio, in modo da creare uno sbilanciamento

tra produzione e consumo in modo da incentivare lo scambio energetico tra i vari locali. Inoltre si è deciso di usare tutti gli orientamenti, anche quelli meno favorevoli, in modo da simulare un caso realistico di tetto a 4 falde che quindi ha 4 orientamenti. Si è notato come la stringa orientata Nord-Ovest sia la più penalizzata sia per l'orientamento sia per l'ombra proiettata dalla parete dell'edificio I3P. La stringa è inoltre associata alla Sala Studio 2 che ha consumi elettrici elevati, pertanto nei mesi invernali la produzione è assolutamente insufficiente per coprire il carico elettrico, ma anche nei mesi estivi si raggiunge un massimo di autosufficienza solo del 50%. La stringa Sud-Est è collegata elettricamente alla Sala Studio 1, pertanto si riesce a superare l'autosufficienza del 60 % in estate, mentre in inverno la produzione è insufficiente. L'ultimo generatore comprende la stringa Sud-Ovest e Nord-Est abbinate rispettivamente alla Sala Controllo e al Locale Tecnico. In questo caso si raggiunge il 100% di autosufficienza da maggio a luglio registrano al tempo stesso elevati eccessi di energia, quindi l'impianto risulta molto sovradimensionato. Per ottimizzare la produzione invernale di energia si potrebbe pensare ad un'inclinazione maggiore delle stringhe: la stringa Sud-Est è inclinata di 20°, ma la si potrebbe inclinare anche a 50° per avere maggiore produzione di energia in inverno e avere meno sprechi in estate; inclinare maggiormente la stringa Nord-Ovest porterebbe ad uno svantaggio mentre si potrebbe inclinare maggiormente anche quella Sud-Ovest; infine la stringa Nord-Est sarebbe meglio se fosse quasi appiattita al tetto. Per il futuro si è infatti prevista una struttura a tilt variabile per tutte le stringhe in modo da ottimizzare in ogni istante e per ogni mese la produzione.

Bibliografia

- [1] E. Frabrizio, M. Filippo , *Il concetto di Zero Energy Building* , conference paper , gennaio 2011.
- [2] NIST Engineering Laboratory , <https://www.nist.gov/el/net-zero-energy-residential-test-facility> , giugno 2016.
- [3] Bioregional, sito ufficiale del quartiere BedZed, <https://www.bioregional.com/bedzed/>.
- [4] F. Brunone, V. Gallotti, *EFFICIENZA e EFFICACIA*, 3a Conferenza Nazionale Poliuretano Espanso rigido, 25 maggio 2017 Milano - Centro Congressi Palazzo Stelline.
- [5] Biosphera 2.0 , <http://www.biosphera2.it/> , anno 2016.
- [6] A. Capozzoli , *Le prestazioni energetiche dei componenti di involucro edilizio opachi* , slides del corso Energetica dell'Edificio, corso di Laurea in Ingegneria Energetica , A.A. 2015-2016.
- [7] A. Capozzoli , A. Gorrino , *Caratterizzazione energetica e tecnologie costruttive dell'involucro edilizio*, Ottobre 2011.
- [8] A. Capozzoli , *La caratterizzazione dinamica dei componenti di involucro edilizio*, slides del corso Energetica dell'Edificio, corso di Laurea in Ingegneria Energetica , A.A. 2015-2016.
- [9] A. Capozzoli, *Le basi del bilancio energetico del sistema edificio-impianto termico* , slides del corso Energetica dell'Edificio, corso di Laurea in Ingegneria Energetica , A.A. 2015-2016.
- [10] Appunti del corso *Power Generation From Renewable Sources*, A.A. 2016-2017.
- [11] F. Spertino , *Conversione Fotovoltaica dell'energia (dispense)*, 2016
- [12] Gestione Servizi Energetici (GSE) , *Rapporto Statistico 2011 Solare Fotovoltaico*, 15/05/2012.
- [13] PEFC Italia , <https://www.pefc.it/>, 2018.
- [14] eco|Home, «www.eco-home.it,» [Online].
- [15] G. Callegari, A. Spinelli , M. Miroglio, A. Bolzonello , *Soluzioni a basso impatto ambientale per l'edilizia e l'interior design*, presentazione Web <https://didattica.polito.it/zxd/cmsdata/attachment/23/Be-ecoPres%20WEBlow.pdf>, 11 marzo 2015.

-
- [16] G. Riva G. Murano , V. Corrado, P. Baggio, G. Antonacci , *Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane* , ENEA, 2010.
- [17] ENEA , *Metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento degli edifici*, 2009.
- [18] U.S. Department of Energy, «Input Output Reference,» EnergyPlus Version 8.9.0 Documentation, Giugno 2018.
- [19] C. Galleri , *Analisi della generazione fotovoltaica e dei carichi termici ed elettrici di un modulo abitativo ad alta efficienza energetica*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, Aprile 2018.
- [20] PHILIPS, *Apparecchi di Illuminazione*, aggiornato al 15 febbraio 2018.
- [21] A. Capozzoli , A. Capozzoli, *Le basi del bilancio energetico del sistema edificio-impianto termico* , slides del corso Energetica dell'Edificio, corso di Laurea in Ingegneria Energetica , A.A. 2015-1016.
- [22] G. V. Fracastoro , M. Perino , *Solar Angles*, slides dal corso Technology For Renewable Energy Sources , Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, A.A. 2016-2017.
- [23] SUNPOWER , <https://www.sunpowercorp.it/scegliere-sunpower/energia-solare-efficiente/> , 2018.
- [24] F.Spertino, *Series/Parallell connections: mismatch of current-voltage characteristics and shading effect*, slides dal corso Power Generation From Renewable Sources , Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, A.A. 2016-2017.
- [25] Paul Gilman, Aron Dobos, Nicholas DiOrio, Janine Freeman, Steven Janzou, and David Ryberg *National Renewable Energy Laboratory*, "SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update" , 2018.
- [26] A. Capozzoli , *Le prestazioni energetiche dei componenti di involucro edilizio opachi* , slides del corso Energetica dell'Edificio, corso di Laurea in Ingegneria Energetica , A.A. 2015-1016.