

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi della generazione fotovoltaica e dei carichi
termici ed elettrici di un modulo abitativo ad alta
efficienza energetica**



Relatori

Prof. Filippo Spertino
Prof. Enrico Fabrizio

Candidata
Chiara Galleri

Aprile 2018

A.A. 2017-2018

Ai miei genitori

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato il risultato di intensi mesi di sforzi e impegni personali ma è anche il frutto del continuo sostegno di tante persone che mi sono sempre state vicine e che non posso dimenticare. Sono fortunata.

Il primo ringraziamento è dedicato al mio relatore Professore Filippo Spertino. La sua pazienza e continua disponibilità mi hanno accompagnata in questo lavoro ma più di tutto, la sua infinita umanità lo rende un esempio per tutti.

Il secondo ringraziamento va al mio relatore Professore Enrico Fabrizio, il quale mi ha indirizzata fin da subito e costantemente nello sviluppo della parte energetica della Tesi, avendo un'infinita disponibilità e pazienza.

Vorrei ringraziare inoltre il Professore Fracastoro, il quale è stato sempre disponibile ad accogliere e risolvere alcuni miei dubbi con interesse sincero. Ringrazio inoltre il Professore Capozzoli e la sua Dottoranda perché hanno avuto la pazienza e la gentilezza di aiutarmi in un momento di difficoltà di questo lavoro.

Un altro ringraziamento va a mia sorella Ambra, una presenza speciale che mi ha incessantemente confortata e, purtroppo per lei, sopportata. È un esempio in tante cose per me. Voglio ringraziare il mio ragazzo Alberto, che ha vissuto in prima persona questo lavoro, sempre credendo in me e incoraggiandomi giorno e notte con la sua enorme pazienza e perseveranza.

Vorrei ringraziare tutti gli amici, i familiari e i ragazzi del Collegio Einaudi. In particolare, un grazie alle mie amiche più preziose, Laura ed Eliana perché mi hanno ascoltata e sostenuta, tenendomi sempre la mano come due sorelle. Un grazie alla mia cara Marialuisa che mi ha sempre aiutata concretamente ed è di insegnamento per me.

Grazie anche a Giorgia, che è stata la mia compagna di viaggio in questo progetto e ha sempre saputo darmi una parola di conforto, facendomi vedere le cose in un'ottica diversa.

Indice

1	Introduzione	1
2	Inquadramento teorico	4
2.1	Il bilancio di massa ed energia di un edificio	5
2.1.1	Bilancio di massa di aria	5
2.1.2	Bilancio di massa di vapore acqueo	6
2.1.3	Bilancio di energia	7
2.2	Pompe di calore.....	10
2.2.1	Pompe di calore a compressione di vapore e principi di funzionamento	11
2.2.2	Pompe di calore ad assorbimento a gas e principi di funzionamento	13
2.2.3	Prestazioni e efficienza	14
2.2.4	Classificazione	17
2.2.5	Tecnologie.....	18
2.3	Generazione fotovoltaica	20
2.3.1	Moduli fotovoltaici	20
2.3.2	Autoproduzione e autoconsumo	23
3	Efficienza Energetica dei moduli abitativi.....	30
3.1	Repertorio di moduli abitativi prefabbricati	33
3.1.1	M.A.D.I.....	33
3.1.2	IT House	34
3.1.3	KODA	35
3.1.4	Casa GG.....	36
3.1.5	ZeroHouse.....	36
4	Il modulo abitativo <i>eco>Home</i>	38
4.1	Il concetto <i>eco>Home</i>	38
4.2	Il modulo	39
4.2.1	La tecnologia <i>NaturWall</i>	41
4.2.2	Stratigrafia	42
4.2.3	Suddivisione in due ambienti e orientamento del modulo	45
5	Obiettivi e metodologia	46
5.1	Il software <i>SketchUp</i>	46
5.2	Il software <i>EnergyPlus</i>	47

5.3	Modellazione del caso studio	51
5.3.1	Edificio.....	51
5.3.2	Superfici schermanti.....	52
5.3.3	Moduli fotovoltaici	54
5.4	Simulazione termo-energetica	56
5.4.1	Il File dei dati climatici	56
5.4.2	Definizione dei parametri di input	59
5.5	Casi Studio.....	73
5.5.1	Caso 1.....	73
5.5.2	Caso 2.....	75
5.6	Calcolo di Progetto Invernale e Estivo	76
5.7	Determinazione dei fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento.....	79
5.8	Determinazione della generazione fotovoltaica.....	80
5.9	Determinazione delle quote di autoconsumo e autoproduzione.....	82
6	Risultati.....	84
6.1	Calcolo di Progetto Invernale ed Estivo.....	85
6.2	Calcolo dei fabbisogni energetici invernali ed estivi	89
6.2.1	Caso 1.....	89
6.2.2	Caso 2.....	98
6.2.3	Confronto tra le diverse configurazioni del Caso 2	110
6.3	Analisi dei consumi elettrici e della generazione fotovoltaica	112
6.3.1	Caso 2 allineato.....	113
6.3.2	Caso 2 senza ostacoli	134
6.3.3	Caso 2 non allineato	137
6.3.4	Confronto tra le diverse configurazioni del Caso 2	139
7	Conclusioni	145
8	Bibliografia	147

Nomenclatura

n	Numero di ricambi di aria, h^{-1}
G_a	Portata in massa di aria secca, kg_a/s
G_v	Portata in massa di vapore, kg_v/s
x	Umidità specifica, kg_v/kg_a
Q_{tr}	Dispersioni termiche per trasmissione, kJ o kWh
Q_{ve}	Dispersioni termiche per infiltrazione o ventilazione, kJ o kWh
$Q_{H,nd}$	Fabbisogno termico per riscaldamento, kJ o kWh _t
$Q_{C,nd}$	Fabbisogno termico per raffrescamento, kJ o kWh _f
Q_{int}	Apporti di calore interni, kJ o kWh
Q_{sol}	Apporti di calore solari, kJ o kWh
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i>
AC	Autoconsumo rispetto alla produzione, %
AP	Autoproduzione rispetto al consumo, %
C_e	Consumo elettrico, kW
P_{FV}	Potenza elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico, kW
E_c	Energia elettrica consumata, kWh
E_{FV}	Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico, kWh
I	Energia immessa, kWh
P	Energia prelevata, kWh
AC_e	Energia elettrica autoconsumata, kWh
AP_e	Energia elettrica autoprodotta, kWh
G	Irradianza solare globale su una superficie, W/m^2
ΔT	Differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno, °C

Capitolo 1

1 Introduzione

Le eccessive emissioni di gas serra e inquinanti, che stanno portando a problemi quale il riscaldamento globale, hanno spinto l'uomo a individuare nuove soluzioni per evitare conseguenze catastrofiche e migliorare la qualità della vita.

In precedenza, con il Conto-Energia 20-20-20, l'Unione Europea aveva posto al centro degli obiettivi la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, l'aumento dell'efficienza energetica e della quota di energia coperta dalla produzione delle fonti rinnovabili. Si sono fatti così spazio temi riguardanti la sostenibilità e lo sfruttamento delle fonti di energia alternative. Nel corso degli anni sono nate nuove tecnologie atte a coordinare e integrare tutti gli sforzi e le soluzioni per il raggiungimento di questi obiettivi, tra cui la *Smart Grid*. La "rete intelligente" racchiude l'essenza della transizione energetica che si sta vivendo, coinvolgendo aspetti multidisciplinari ma interconnessi tra loro. Al suo interno, le fonti rinnovabili e gli edifici diventano i protagonisti di questo cambiamento e i mezzi attraverso cui realizzare una vera e propria rivoluzione energetica. L'edificio, responsabile di circa il 40% del consumo totale di energia in Europa e del 36% delle emissioni di gas serra, assume un ruolo fondamentale, mentre le fonti rinnovabili, sostenibili e gratuite, permettono di raggiungere l'autosufficienza e addirittura consentono all'edificio di diventare una piccola centrale di produzione di energia.

L'efficienza energetica è un tema vasto e multidisciplinare. Coinvolge competenze che vanno dall'Architettura all'Ingegneria, dall'Informatica all'Urbanistica. Un'elevata efficienza energetica è raggiunta non solo attraverso una gestione ottimale dei consumi e la minimizzazione degli sprechi energetici ma anche grazie ad un'attenta scelta dei materiali, dell'isolamento termico e un'accorta integrazione dei sistemi di energia alternativa. In particolare i moduli abitativi prefabbricati, realizzati in materiali eco sostenibili, quali il legno, sembrano essere la soluzione per il conseguimento di alti standard di efficienza energetica. Nati inizialmente come alloggi di emergenza a causa di catastrofi naturali, quali i terremoti, sono stati in seguito considerati una valida opzione nell'ambito della sostenibilità ed efficienza energetica. Gli elementi prefabbricati già testati prima del loro assemblaggio, i materiali eco-compatibili di cui sono fatti, i ridotti tempi di installazione, la struttura leggera, facilmente trasportabile in qualsiasi luogo e riutilizzabile, nonché le basse emissioni di gas inquinanti durante tutta la filiera produttiva fanno dei moduli prefabbricati i modelli dell'Architettura sostenibile.

Questo lavoro ha avuto come oggetto di studio e analisi un modulo abitativo prefabbricato ad alta efficienza energetica, sviluppato dalla start-up *be-eco*, società di ricerca operante

all'interno dell'Incubatore di Imprese Innovative del Politecnico di Torino. Utilizzato inizialmente come Penitenzieria durante l'esposizione della Sacra Sindone a Torino, si è successivamente deciso di adibirlo a Sala Studio e Sala Riunioni per il Politecnico di Torino, ipotizzando l'installazione dietro la mensa universitaria EDISU. È stata inoltre supposta la presenza di un impianto fotovoltaico da 7,2 kW totali posto sulla copertura, che tuttavia, alimenta separatamente Sala Studio e Sala Riunioni. I moduli fotovoltaici di ciascun ambiente sono orientati in modo tale da massimizzare la produzione durante le ore del mattino e del pomeriggio per la Sala Riunioni, durante l'arco della giornata per la Sala Studio, coerentemente con le ore di funzionamento di ogni ambiente.

Il modulo abitativo è stato rappresentato sul software di modellazione 3D *SketchUp*, con Plug-in *Open Studio*, definendo preliminarmente le zone termiche di cui è composto, gli ostacoli circostanti e il sistema fotovoltaico. Il modello è stato in seguito esportato sul software di simulazione energetica *EnergyPlus*, all'interno del quale sono state definite tutte le caratteristiche dell'edificio, tra cui le proprietà dei materiali che lo compongono, le stratigrafie, i carichi interni, il sistema *HVAC* e il controllo termostatico di ciascun ambiente.

Oggetto dell'analisi sono state principalmente quattro configurazioni:

	Caso 1	Caso 2		
		Caso allineato	Caso senza ostacoli	Caso non allineato
Tipo di funzionamento	"A pieno carico"	"Carichi ridotti"		
Ostacoli (Mensa EDISU + alberi)	Presenti	Presenti	Non presenti	Presenti
Orientamento del modulo abitativo	Concorde con l'orientamento degli edifici circostanti	Concorde con l'orientamento degli edifici circostanti	Concorde con l'orientamento degli edifici circostanti	In linea con le direzioni dei punti cardinali
Orientamento dei moduli fotovoltaici	Sala Riunioni: Sud-est e Nord-ovest Sala Studio: Sud-ovest	Sala Riunioni: Sud-est e Nord-ovest Sala Studio: Sud-ovest	Sala Riunioni: Sud-est e Nord-ovest Sala Studio: Sud-ovest	Sala Riunioni: Est e Ovest Sala Studio: Sud

La prima parte del lavoro è incentrata su un'analisi termo-energetica.

Sul software *EnergyPlus* sono state effettuate varie simulazioni con lo scopo di:

- Dimensionare il sistema di riscaldamento e raffrescamento, nonché la taglia della pompa di calore, determinando i carichi termici di picco invernale ed estivo per ciascun ambiente. Per tale analisi si è fatto riferimento al Caso 1, che prevede un funzionamento "massimo" dei due ambienti.
- Stimare i fabbisogni termici ed elettrici per riscaldamento e raffrescamento di ciascun ambiente, sia per il Caso 1 sia per i tre sotto-casi del Caso 2. In tal modo

si è potuta osservare la variabilità dei consumi termici in funzione delle differenti configurazioni.

La seconda parte del lavoro è dedicata all'analisi elettrica del modulo abitativo. Tramite il File dei dati climatici caricato sul software *EnergyPlus* è stato possibile ottenere come *output* delle simulazioni la radiazione solare incidente sui moduli fotovoltaici. Si sono quindi stimati i consumi elettrici totali e la generazione fotovoltaica dei tre sotto-casi del Caso 2, focalizzando quindi l'analisi su un funzionamento meno energivoro del modulo abitativo.

Per la valutazione della qualità dell'accoppiamento tra carichi elettrici e produzione fotovoltaica si sono analizzate in dettaglio le curve orarie di generazione e consumi di ciascun ambiente, in riferimento al Caso "allineato", evidenziando anche le quote di consumo elettrico della pompa di calore. Infine si sono stimati due parametri importanti che hanno permesso di quantificare la percentuale di energia elettrica prodotta utile alla copertura della domanda e la percentuale di energia elettrica richiesta coperta dalla generazione fotovoltaica: rispettivamente l'autoconsumo e l'autosufficienza.

Infine, si è eseguito un confronto tra i diversi casi, analizzando come l'orientamento dell'edificio e gli ostacoli incidono sia sui consumi elettrici sia sulla generazione fotovoltaica.

Capitolo 2

2 Inquadramento teorico

Un'analisi accurata degli elementi di cui è composto un edificio è di fondamentale importanza per la valutazione dei fabbisogni termici sia di riscaldamento che raffrescamento.

A causa di una differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno ciascun componente è attraversato da calore, mentre la variazione nel tempo della grandezza che ha determinato il disequilibrio – in questo caso la differenza di temperatura – fa sì che i componenti possano addirittura accumularlo.

Lo studio viene condotto ipotizzando di racchiudere l'ambiente di interesse all'interno di un volume di controllo, rappresentato dall'involucro edilizio. Al suo interno si vogliono mantenere prefissate condizioni di temperatura e umidità dell'aria per garantire l'equilibrio e il benessere termo-igrometrico di tutto ciò che è presente (persone, animali, piante, apparecchi elettrici). L'involucro edilizio, delimitato dalle superfici interne dell'ambiente, si comporta come un sistema termodinamico aperto che scambia energia e massa con l'ambiente esterno. In altre parole, esso rappresenta il confine fisico che delimita l'ambiente interno da quello esterno [1].

Un'analisi del sistema in regime stazionario tiene conto del solo effetto di trasmissione del calore tra ambiente interno ed esterno e non prende in considerazione alcuna variazione della forzante termica.

Un'analisi in regime dinamico permette invece di tenere conto anche del fenomeno dell'accumulo da parte dei componenti dell'edificio¹. È quindi evidente come il regime dinamico permetta un'analisi completa di ciò che accade e porti a un calcolo verosimile dei carichi termici per riscaldamento e raffrescamento. Ora per ora infatti, a causa delle variazioni della temperatura esterna, variano i fabbisogni termici richiesti per garantire all'interno dell'ambiente una data temperatura di comfort.

In condizioni invernali, la presenza di un opportuno strato di isolamento e un'adeguata coibentazione giocano un ruolo fondamentale nel preservare l'ambiente interno dalle rigide condizioni climatiche dell'ambiente esterno.

¹Si assume che i corpi trasparenti, come le superfici vetrate, non partecipino a questo fenomeno a meno che la struttura sia particolarmente complessa.

Nelle condizioni estive invece, i componenti dovranno possedere la capacità di ridurre – ossia smorzare – e ritardare – ossia sfasare – le sollecitazioni termiche. In altre parole, dovranno possedere una buona inerzia termica. Essendo il calore accumulato dal materiale, dipendente dalla massa volumica e dal calore specifico dello stesso, una buona inerzia termica sarà data dunque da adeguati valori di queste due quantità. [2]

2.1 Il bilancio di massa ed energia di un edificio

L'ambiente esterno determina delle sollecitazioni sull'ambiente interno attraverso fattori come la radiazione solare, la temperatura esterna e le condizioni meteorologiche.

Attraverso l'impianto è possibile far fronte alle sollecitazioni indotte dall'ambiente esterno per mantenere nell'ambiente interno le condizioni di temperatura e umidità volute [1].

Ai fini di una corretta modellazione dell'edificio dal punto di vista termofisico, è necessario ricorrere a tre bilanci fondamentali:

- Bilancio di massa di aria
- Bilancio di massa di vapore acqueo
- Bilancio di energia

2.1.1 Bilancio di massa di aria

L'ambiente interno, appartenente all'involucro edilizio, è attraversato da una massa di aria, la quale si sposta tra ambiente interno e esterno, essenzialmente per due fenomeni: l'infiltrazione e la ventilazione.

L'*infiltrazione* è un fenomeno non controllato, dovuto a un ingresso di aria esterna nell'ambiente interno, attraverso fessure, porte o finestre. Questo fenomeno è causato da una differenza di temperatura, la quale genera una differenza di pressione che fa sì che l'aria fluisca dall'esterno verso l'interno.

L'*exfiltrazione* è invece un fenomeno secondo cui l'aria interna fluisce verso l'ambiente esterno.

La *ventilazione* è un fenomeno che avviene in maniera controllata, determinando un ingresso di aria esterna nell'involucro edilizio. La ventilazione può essere naturale, con ingresso di aria esterna attraverso l'apertura volontaria di porte o finestre, e meccanica, messa in atto attraverso impianti di ventilazione che consumano energia elettrica.

L'importanza di effettuare dunque un ricambio di aria interna con un volume di aria più pulito, ricco di minore umidità e fattori di inquinamento, è data dall'esigenza di controllare la qualità interna dell'aria (*Indoor Air Quality*).

La quantità di aria che viene ricambiata, può essere espressa in ricambi orari [h^{-1}], ovvero il tasso di rinnovo del volume di aria nell'ambiente in un'ora.

E' dunque definito come:

$$n = \frac{q_v}{V} \quad (2.1)$$

Dove q_v è la portata di aria [m^3/s] e V il volume dell'ambiente interno [m^3].

Il bilancio di aria all'interno dell'ambiente è definito come:

$$\sum_i G_{in} - \sum_j G_{out} = \frac{dm}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

Dove G_{in} e G_{out} sono rispettivamente la portata in massa entrante (per infiltrazione, ventilazione naturale e ventilazione meccanica) e uscente dall'ambiente interno per exfiltrazione, ventilazione naturale e ventilazione meccanica, espresse in kg/s . Il termine $\frac{dm}{dt}$ rappresenta invece la variazione di aria all'interno dell'ambiente, nell'intervallo di tempo dt ed è considerata trascurabile.

L'equazione (2.2) indica che la quantità di aria uscente dall'involucro edilizio è compensata dalla quantità di aria entrante in ambiente.

2.1.2 Bilancio di massa di vapore acqueo

Il vapore acqueo si genera in ambiente a causa della presenza di animali, piante e persone che svolgono una determinata attività. Inoltre la variazione dell'umidità presente è dovuta anche ai ricambi di aria sia per ventilazione meccanica e naturale che per infiltrazione. L'equazione che esprime questa variazione è la seguente:

$$\sum_i (G_{a,in} \cdot x_{in})_i - \sum_j (G_{a,out} \cdot x_{out})_j + G_{vap,I} + G_{vap,H} = \frac{dm_{vap}}{dt} = G \cdot \frac{dx_i}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

Dove:

- $(G_{a,in} \cdot x_{in})$ rappresenta il flusso di vapore entrante in ambiente [kg_v/s], con portata di aria secca $G_{a,in}$ [kg_a/s] e umidità specifica x_{in} [kg_v/kg_a].
- $(G_{a,out} \cdot x_{out})$ rappresenta il flusso di vapore uscente dall'ambiente [kg_v/s], con portata di aria secca $G_{a,out}$ [kg_a/s] e umidità specifica x_{out} [kg_v/kg_a].
- $G_{vap,I}$ rappresenta la portata di vapore prodotta dalle sorgenti interne, espressa in kg_v/s . Essendo una portata prodotta è sempre positiva.

- $G_{vap,H}$ rappresenta la portata di vapore prodotta dall'impianto, espressa in kg/s. L'immissione di una portata di vapore è positiva e indica che l'impianto umidificando. La rimozione di una portata di vapore è negativa e indica che l'impianto sta deumidificando.
- $\frac{dm_{vap}}{dt}$ rappresenta la variazione della portata di vapore all'interno dell'ambiente nell'unità di tempo e risulta trascurabile. Può essere espressa anche come prodotto tra la portata di aria e la variazione nel tempo dell'umidità specifica: $G \cdot \frac{dx_i}{dt}$.

L'equazione sopra può essere semplificata considerando che vi sia un'unica portata di vapore entrante e uscente dall'ambiente interno ($G_{a,in} = G_{a,out} = G$):

$$G \cdot (x_{out} - x_{in}) + G_{vap,I} + G_{vap,H} = 0 \quad (2.4)$$

2.1.3 Bilancio di energia

L'equazione che esprime il bilancio di energia per un sistema aperto, nel volume di controllo VC e nell'intervallo di tempo Δt è la seguente [1]:

$$\sum_i Q_i - \sum_j L_j = \sum_k G_k \cdot \left(h + g \cdot z + \frac{v^2}{2} \right)_k \cdot \Delta t + \Delta E_{vc} \quad (2.5)$$

Dove:

- Q_i è il calore i-esimo espresso in kJ, positivo se entrante nel sistema e negativo se uscente dal sistema.
- L_j è il lavoro j-esimo espresso in kJ, positivo se uscente dal sistema (ossia prodotto dal sistema) e negativo se entrante (ossia assorbito e richiesto dal sistema).
- G_k è la portata in massa k-esima del fluido in ingresso o in uscita dal sistema in kg/s. E' positiva se uscente dal sistema mentre è negativa se entrante nel sistema.
- h è l'entalpia associata al flusso in massa uscente o entrante nel sistema, espressa in kJ/kg K.
- z è la quota della portata in massa, espressa in metri, misurata rispetto a un sistema di riferimento.
- g è l'accelerazione di gravità pari a $9,8 \text{ m/s}^2$.
- v è la velocità del flusso in m/s.

- Δt è l'intervallo di tempo [s].
- ΔE_{vc} è la variazione di energia totale nel volume di controllo [kJ].

Assumendo che:

- Il sistema sia stazionario e quindi $\Delta E_{vc}=0$.
- Le variazioni di energia cinetica e potenziale siano trascurabili.
- Normalmente $\sum_j L_j=0$ negli edifici.
- Nel sistema ci sia un solo ingresso e una sola uscita, ossia $G_{entranti}=G_{uscenti}=G$ e l'aria secca uscente o entrante dal volume di controllo sia un gas ideale, ossia $\Delta h=c_p\Delta T$.

L'equazione diventa:

$$\sum_i Q_i = G_a \cdot c_p \cdot (\Delta T) \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

Per scrivere correttamente l'equazione di bilancio di energia (2.5), è necessario considerare tutti i flussi di calore uscenti ed entranti nel sistema. Ipotizzando che l'ambiente interno si trovi a una temperatura T_i e l'ambiente esterno si trovi a una temperatura T_e – costante per le ipotesi di stazionarietà – il flusso di calore attraversa le superfici di controllo dell'involucro in funzione delle condizioni climatiche esterne. In regime invernale i flussi possono così essere suddivisi:

- Flussi di calore dispersi: sono costituiti dalle dispersioni termiche per trasmissione ($Q_{H,tr}$) e dalle dispersioni termiche per infiltrazione o ventilazione ($Q_{H,ve}$) a causa di una differenza di temperatura ΔT . Sono da valutare le dispersioni termiche sia verso l'ambiente esterno sia verso altri ambienti non climatizzati o con temperature differenti. Le dispersioni termiche hanno un peso differente a seconda dei materiali di cui l'edificio è composto e per il loro calcolo si tiene conto della stratigrafia e delle proprietà delle superfici opache dell'edificio (pareti verticali, copertura, solaio ecc.), dei serramenti esterni (superfici vetrate, telai, sistemi di oscuramento ecc.) e di eventuali ponti termici.
- Apporti di calore: sono forniti dal sistema di riscaldamento ($Q_{H,nd}$) oppure dovuti a sorgenti interne (come apparecchiature elettriche, presenza di persone, sistemi di illuminazione ecc.) (Q_{int}) o agli apporti di calore gratuiti legati alla radiazione solare (Q_{sol}).

Scrivendo l'equazione di bilancio (2.6) in termini di flussi di calore [kJ] in condizioni invernali, rappresentati in Figura 2.1, si avrà:

$$Q_{int} + Q_{sol} + Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} \quad (2.7)$$

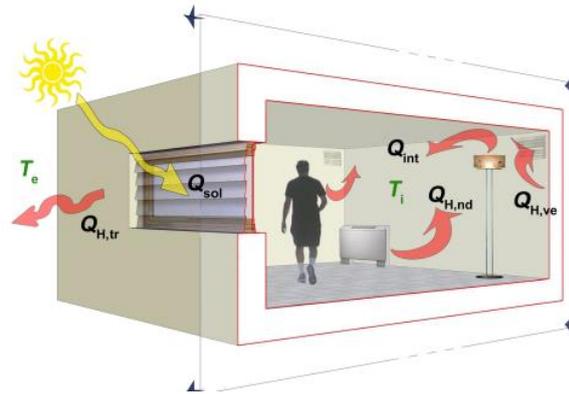


Figura 2.1: Flussi di calore nell'involucro edilizio - Caso Invernale

Esplicitando l'equazione (2.7), il fabbisogno di energia per il riscaldamento sarà:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - Q_{int} - Q_{sol} \quad (2.8)$$

In condizioni estive, in Figura 2.2, invece, l'equazione (2.6) diventa:

$$Q_{C,nd} = Q_{int} + Q_{sol} - Q_{C,tr} - Q_{C,ve} \quad (2.9)$$

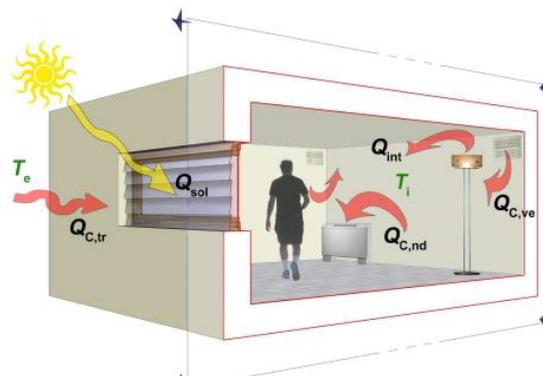


Figura 2.2: Flussi di calore nell'involucro edilizio - Caso Estivo

Per inserire un effetto dinamico al calcolo stazionario dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento è necessario apportare una modifica alle equazioni precedenti, introducendo un coefficiente detto *fattore di utilizzazione*. Il fattore di utilizzazione quantifica i flussi di calore utili alla riduzione del fabbisogno termico per riscaldamento e raffrescamento dell'edificio. In condizioni invernali il coefficiente di utilizzazione è

referito agli apporti gratuiti interni e solari, in condizioni estive alle dispersioni termiche per trasmissione, infiltrazione e ventilazione.

Introducendo i fattori di utilizzazione nelle equazioni (2.8) e (2.9) si ha:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - \eta_H \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (2.10)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_C \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (2.11)$$

In condizioni invernali, il fattore di utilizzazione degli apporti è dato dal rapporto tra gli apporti gratuiti che compensano le dispersioni e tutti gli apporti gratuiti entranti. Tiene quindi conto che solo una parte degli apporti gratuiti interni e solari è utile alla riduzione del fabbisogno termico per riscaldamento mentre la restante parte determina solamente un surriscaldamento dell'ambiente.

In condizioni estive, il fattore di utilizzazione degli apporti è dato dal rapporto tra le dispersioni che compensano gli apporti gratuiti e le dispersioni totali. Esso tiene conto del fatto che non tutte le dispersioni vengono utilizzate ai fini di ridurre il fabbisogno termico per raffrescamento. La restante parte causa infatti un sottoraffreddamento dell'ambiente, determinando un discostamento della temperatura interna dalle condizioni di set-point.

2.2 Pompe di calore

Con la Direttiva RES (*Renewable Energy Sources*) [3], le pompe di calore sono annoverate all'interno dei sistemi rinnovabili in quanto sfruttano il calore disponibile gratuitamente in risorse naturali come aria, acqua superficiale o di falda per la climatizzazione dell'edificio.

A differenza dei sistemi di riscaldamento tradizionali quali caldaie, stufe ecc., l'unica forma di energia consumata dalla pompa di calore è l'energia elettrica, impiegata per far funzionare il compressore e compiere lavoro meccanico. Non si assiste alla combustione di gas o altri materiali e non si consuma quindi combustibile, limitando così l'impatto sull'ambiente. Il calore non viene dunque prodotto ma estratto direttamente da una sorgente fredda, per poi essere trasferito all'ambiente interno mediante un ciclo chiuso percorso da un fluido frigorifero. Questo consente di ottenere un effetto utile maggiore rispetto all'energia elettrica che viene consumata e avere così una resa più alta. La spesa di energia per far funzionare una pompa di calore è rappresentata solamente da un 25% di energia elettrica. La restante parte, circa il 75 %, rappresenta invece l'energia termica che proviene gratuitamente dall'ambiente esterno. Il risparmio è perciò di un 40-70 % rispetto ai sistemi tradizionali [4], [5].

La pompa di calore è una macchina termica a ciclo inverso. Assorbendo energia meccanica, permette di trasferire calore da una sorgente a temperatura minore (l'ambiente esterno a T_{amb}) a una a temperatura maggiore (l'ambiente interno a temperatura T_H) utilizzando un fluido che, nel diagramma termodinamico, compie una trasformazione in senso antiorario, da cui il nome di inverso. Una macchina termica frigorifera ha invece come obiettivo il prelievo di una certa quantità di calore da un ambiente a temperatura più bassa (l'ambiente interno a temperatura T_C), per cederlo a un serbatoio a temperatura più alta (l'ambiente esterno) (Figura 2.3).

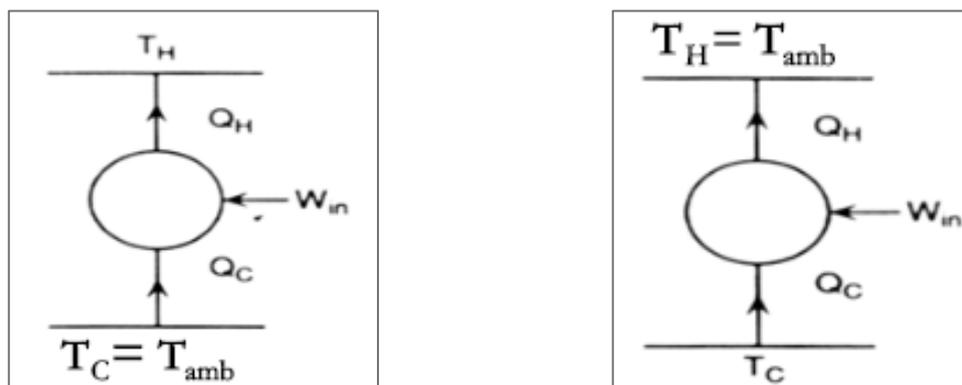


Figura 2.3: Schemi di funzionamento rispettivamente di un pompa di calore e di una macchina frigorifera

Quando la finalità è quella sia di riscaldare che raffreddare l'edificio, la pompa di calore può soddisfare questa esigenza, funzionando reversibilmente e dunque anche come macchina frigorifera. Ciò significa che in condizioni invernali sarà in grado di apportare calore all'ambiente mentre in condizioni estive sarà in grado di asportare calore dall'ambiente e trasferirlo all'esterno per mantenere il set-point di temperatura richiesto. Le pompe di calore producono calore a bassa temperatura ed è dunque necessaria una attenta valutazione delle tipologie di terminali in ambiente già esistenti o da installare. L'uso della pompa di calore può infine essere integrato a un sistema fotovoltaico o che impiega altre fonti rinnovabili per fornire – totalmente o in parte – l'energia elettrica necessaria per il suo funzionamento. Il risultato è dunque un notevole risparmio energetico.

2.2.1 Pompe di calore a compressione di vapore e principi di funzionamento

Le pompe di calore a compressione di vapore sono le maggiormente utilizzate. Esse possono operare reversibilmente, sia per riscaldare che per raffreddare, mediante l'impiego di un fluido di lavoro che percorre un circuito chiuso e scambia energia termica con una sorgente calda e una sorgente fredda. Ciò avviene per mezzo di scambiatori di calore, che consentono uno scambio tra fluido frigorifero e fluido esterno.

La pompa di calore è composta da quattro principali componenti: il compressore, l'evaporatore, il condensatore e la valvola di laminazione. Nella Figura 2.4 è possibile osservare il ciclo termodinamico percorso dal fluido di lavoro della macchina termica, rappresentato nel diagramma Temperatura-entropia (diagramma T-s) [6].

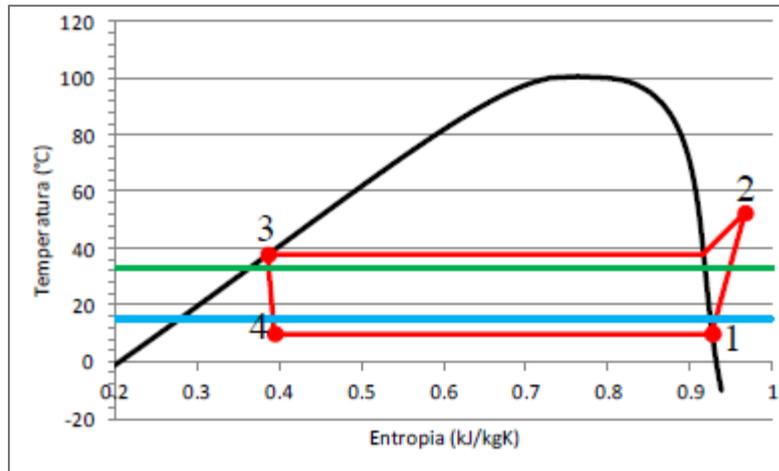


Figura 2.4: Trasformazioni nel diagramma termodinamico T-s

- Trasformazione 1-2: Il fluido di lavoro, allo stato di vapore, viene aspirato dal compressore, un componente che, assorbendo energia elettrica, sviluppa una potenza meccanica in grado di aumentare la pressione del fluido. In questo modo il fluido si riscalda, raggiungendo temperature e pressioni molto alte.
- Trasformazione 2-3: Il fluido successivamente entra nel condensatore, lo scambiatore di calore che permette lo scambio di calore tra fluido di lavoro e fluido esterno. Il fluido frigorifero subisce una condensazione ad alta pressione, cedendo calore a temperatura e pressione costanti al fluido esterno che si trova a una temperatura minore, il quale rappresenta la sorgente calda.
- Trasformazione 3-4: Il fluido di lavoro, in uscita dal condensatore, attraversa successivamente una valvola di laminazione. Subisce così un raffreddamento e un'espansione, trasformandosi in una miscela di liquido-vapore a bassa pressione.
- Trasformazione 4-1: Il fluido, in uscita dalla valvola di espansione, entra successivamente nell'evaporatore. In questo componente il fluido di lavoro evapora a bassa pressione, assorbendo calore da un altro fluido esterno a temperatura maggiore e che rappresenta la sorgente fredda. Il fluido di lavoro diventa così vapore a bassa temperatura.

La rappresentazione sul diagramma T-s si rivela utile per visualizzare i livelli termici, sia del fluido che percorre la trasformazione, sia dei fluidi esterni con cui avviene lo scambio termico. Si può notare come la temperatura di condensazione del fluido frigorifero sia

sempre maggiore della temperatura del fluido esterno al quale si vuole cedere calore. Invece, la temperatura di evaporazione del fluido di lavoro è sempre minore della temperatura del fluido esterno dal quale si vuole ricevere calore.

In condizioni invernali, l'obiettivo è quello di ottenere un riscaldamento del fluido esterno, ossia dell'aria nell'ambiente interno, grazie al calore di condensazione del fluido di lavoro della macchina termica. L'ambiente interno è un serbatoio caldo.

In assetto estivo, ciò che si vuole ottenere è un raffrescamento dell'ambiente interno, che avviene grazie alla cessione di calore al fluido di lavoro, richiesta per l'evaporazione. Il calore di condensazione del fluido interno è rigettato nell'ambiente esterno, il quale rappresenta in questo caso un pozzo di calore (Figura 2.5) [6].

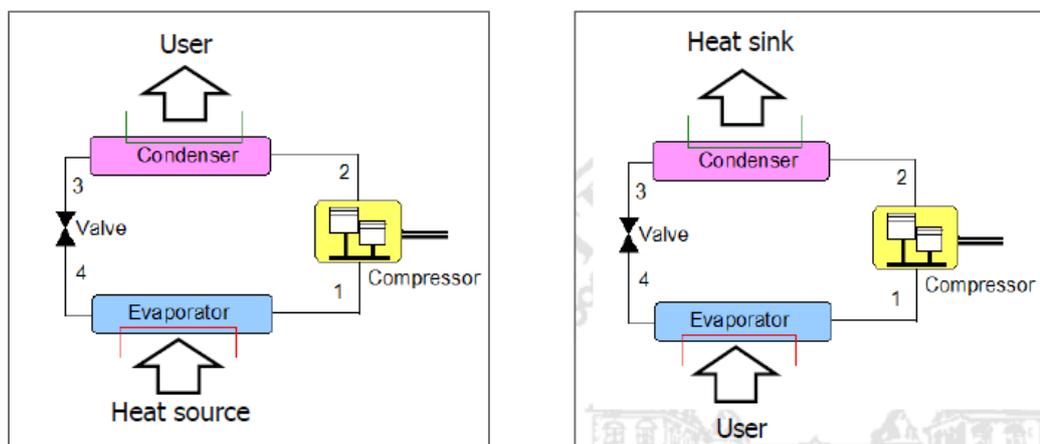


Figura 2.5: Assetto invernale ed estivo di una PdC

2.2.2 Pompe di calore ad assorbimento a gas e principi di funzionamento

In questa tipologia di macchina, la fase di compressione delle pompe di calore a compressione di vapore è sostituita da una fase di generazione e assorbimento. L'aspetto innovativo è che la reazione di assorbimento, generando energia termica, consente di ridurre la quantità di combustibile utilizzata dal generatore e di rendere il funzionamento della macchina meno sensibile alle variazioni di temperatura della sorgente esterna [5]. In Figura 2.6 è mostrato il funzionamento del ciclo. In grigio sono evidenziati i componenti che sostituiscono il compressore.

Il generatore a gas fornisce l'energia termica necessaria per avviare il ciclo, senza impiegare energia elettrica. Il generatore è formato da due componenti: un bruciatore e una colonna di distillazione. Il bruciatore fornisce calore a una soluzione assorbente-refrigerante, composta ad esempio da acqua e ammoniaca o acqua e bromuro di litio. Il refrigerante possiede un punto di ebollizione minore ed evapora prima, separandosi dal fluido assorbente nella colonna di distillazione in una prima fase, e successivamente nel rettificatore.

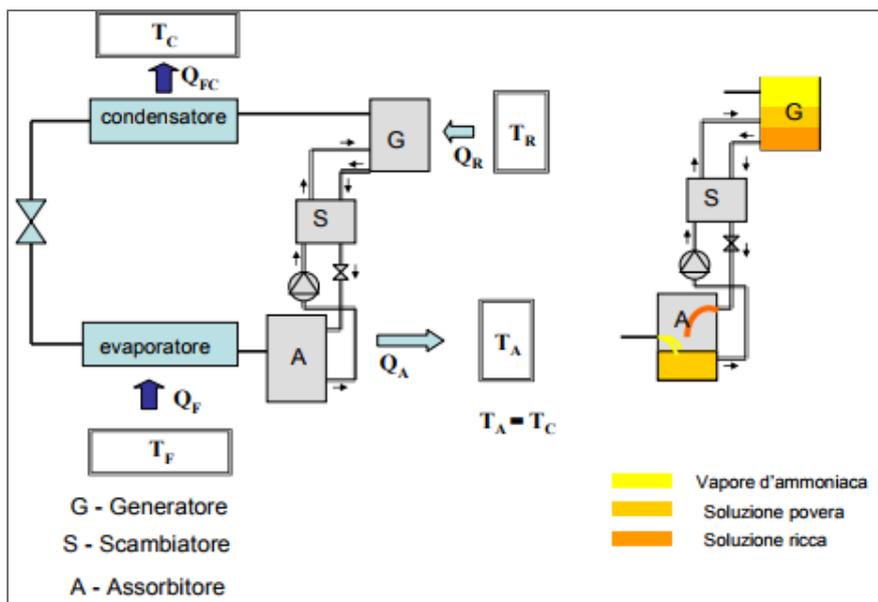


Figura 2.6: Schema di funzionamento di una PdC ad assorbimento a gas

Il refrigerante puro, allo stato gassoso, entra all'interno di uno scambiatore di calore a fascio tubiero - il condensatore - dove avviene il primo effetto utile della macchina. Per mezzo della condensazione, il refrigerante cede calore all'ambiente interno. Successivamente, il fluido refrigerante raggiunge pressioni e temperature più basse per mezzo di un processo di espansione e raffreddamento nella sezione di laminazione. Il refrigerante, ora nella fase liquida, entra nell'evaporatore dove assorbe calore dall'aria dell'ambiente esterno, trasformandosi così in vapore.

In seguito, dopo essere stato surriscaldato in un altro scambiatore di calore, entra nel pre-assorbitore, dove si miscela con il fluido assorbente allo stato gassoso, dando origine a una reazione di assorbimento. Il calore liberato dalla reazione esotermica è ceduto all'ambiente interno, ottenendo così il secondo effetto utile. In seguito, la miscela viene inviata, per mezzo di una pompa, in uno scambiatore di calore, per essere pre-riscaldata dal fluido assorbente proveniente dal generatore e in ingresso all'assorbitore. Infine, la miscela è mandata al generatore, dove inizia nuovamente il ciclo.

All'interno della macchina è presente una valvola di inversione a quattordici vie, che è in grado di invertire il ciclo di funzionamento della macchina, a seconda della stagione invernale ed estiva.

2.2.3 Prestazioni e efficienza

Per quantificare le prestazioni di una pompa di calore a compressione di vapore è possibile far riferimento a diversi indici di prestazione.

Per il funzionamento in assetto di riscaldamento ci si riferisce al COP (*Coefficient of Performance*), definito come il rapporto tra l'effetto utile che viene prodotto - il calore fornito o asportato da un fluido esterno - e l'energia spesa per ottenerlo, ossia la potenza

elettrica assorbita dal compressore. In condizioni di funzionamento estivo, la prestazione della pompa di calore (se funziona reversibilmente) o della macchina frigorifera viene valutata mediante un indice di efficienza energetica detto EER (*Energy Efficiency Ratio*), avente medesima definizione del COP.

L'efficienza in condizioni invernali è data da:

$$COP_{hp} = \frac{\Phi_{cond}}{W_{el}} \quad (2.12)$$

In condizioni estive il coefficiente di prestazione può invece essere espresso come:

$$COP_f = EER = \frac{\Phi_{eva}}{W_{el}} \quad (2.13)$$

Dove Φ_{eva} e Φ_{cond} sono rispettivamente la potenza di evaporazione [W] richiesta dal fluido di lavoro e la potenza di condensazione [W] ceduta dal fluido di lavoro.

La potenza elettrica può essere espressa mediante il prodotto tra l'efficienza di conversione della potenza elettrica in potenza meccanica e la potenza meccanica, essendo l'efficienza data da:

$$\eta_{el \rightarrow mec} = \frac{W_{mec}}{W_{el}} \quad (2.14)$$

Le equazioni sopra possono essere espresse anche in termini di salti entalpici (per questo si faccia riferimento alla Figura 2.4). Prendendo in considerazione le equazioni (2.13) e (2.14) si può scrivere:

$$COP_{hp} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \cdot \eta_{el \rightarrow mec} \quad (2.15)$$

$$COP_f = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \cdot \eta_{el \rightarrow mec} \quad (2.16)$$

Un'osservazione importante è che minore è la differenza di temperatura tra i due fluidi esterni minore è la spesa di energia elettrica e dunque meccanica. Si ottengono così degli alti COP e minori irreversibilità del processo. Il COP risulta essere maggiore quanto più bassa è la temperatura della sorgente calda e quanto più alta è la temperatura della sorgente fredda. L'efficienza di una pompa di calore è inoltre maggiore nel periodo di riscaldamento piuttosto che di raffrescamento in quanto la macchina dissipa una parte

dell'energia meccanica in calore, utile poi al riscaldamento dell'ambiente. Il numeratore (h_2-h_3) sarà dunque più alto a parità di potenza meccanica spesa [6].

I valori medi di COP si aggirano intorno ai 3-5. In climi molto rigidi, in cui le temperature esterne arrivano a -8°C , il COP di una pompa di calore diminuisce, in quanto si farà più fatica a riscaldare l'ambiente con una temperatura esterna molto bassa. Questo non accade con pompe di calore geotermiche, in quanto l'acqua presente nel sottosuolo mantiene una temperatura costante durante tutta la stagione.

Per quanto riguarda le pompe di calore ad assorbimento a gas, il GUE (*Gas Utilization Efficiency*) è il parametro con cui si quantifica l'efficienza, dato dal rapporto tra l'energia termica fornita all'ambiente interno e l'energia termica consumata dal bruciatore, ossia il potere calorifico inferiore del combustibile [5].

In condizioni di riscaldamento, valori medi del GUE vanno da 1,3 a 1,6 mentre in condizioni di raffrescamento i valori sono superiori a 0,6. Tuttavia, la normativa italiana esprime l'efficienza energetica delle pompe di calore a gas, in termini di COP e EER, in condizioni rispettivamente di riscaldamento e raffrescamento. Si deve però prestare attenzione al fatto che tali coefficienti sono comunque valutati sulla base dell'indice GUE.

Con l'entrata in vigore, dal 1° Gennaio 2013, della Direttiva 2010/30/UE - che regola le nuove etichette energetiche da apporre ai climatizzatori ad aria - per i climatizzatori di tipo split, i coefficienti COP e EER sono stati rispettivamente sostituiti dai nuovi indici SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*) e SEER (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*). Tali indici sono rappresentativi dell'efficienza energetica della macchina termica per l'intera stagione di riscaldamento e/o raffrescamento. Sono definiti come il rapporto tra la potenza termica stagionale prodotta - in condizioni di riscaldamento o raffrescamento - e la potenza elettrica stagionale consumata. La differenza rispetto ai coefficienti utilizzati in precedenza, risiede nel fatto che i primi sono valutati in condizioni di funzionamento standard della pompa di calore, mentre gli ultimi tengono conto della stagione di utilizzo della macchina termica sulla base delle condizioni stagionali europee, delle condizioni di progetto prese come riferimento - nonché delle temperature esterne - e delle ore di accensione che causano una degradazione dell'efficienza [7]. In altre parole, i coefficienti SCOP e SEER valutano l'efficienza sulla base dei valori assunti dai coefficienti COP e EER al variare delle temperature esterne giornaliere stagionali in riferimento alla normativa². Ciascun indice è inoltre associato alle classi energetiche di ciascuna macchina, come visibile in Figura 2.7.

² www.hidropoint.it

Classe di efficienza energetica	SEER	SCOP
A+++	$SEER \geq 8,50$	$SCOP \geq 5,10$
A++	$6,10 \leq SEER < 8,50$	$4,60 \leq SCOP < 5,10$
A+	$5,60 \leq SEER < 6,10$	$4,00 \leq SCOP < 4,60$
A	$5,10 \leq SEER < 5,60$	$3,40 \leq SCOP < 4,00$
B	$4,60 \leq SEER < 5,10$	$3,10 \leq SCOP < 3,40$
C	$4,10 \leq SEER < 4,60$	$2,80 \leq SCOP < 3,10$
D	$3,60 \leq SEER < 4,10$	$2,50 \leq SCOP < 2,80$
E	$3,10 \leq SEER < 3,60$	$2,20 \leq SCOP < 2,50$
F	$2,60 \leq SEER < 3,10$	$1,90 \leq SCOP < 2,20$
G	$SEER < 2,60$	$SCOP < 1,90$

Figura 2.7: Classi di Efficienza Energetica per climatizzatori split

2.2.4 Classificazione

Le pompe di calore si suddividono in base alla tipologia di fluidi esterni e fluido frigorifero impiegati. I fluidi esterni possono essere l'aria dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno, che scambiano direttamente calore con il fluido frigorifero che scorre nei terminali dell'impianto e che percorre il ciclo termodinamico (sistemi a espansione diretta). In alternativa, possono essere utilizzati dei fluidi intermedi, generalmente acqua, che scorrono nei terminali e scambiano calore con il fluido di lavoro della macchina (sistemi idronici).

In Figura 2.8 è illustrata la rappresentazione che chiarisce, in condizioni invernali, il funzionamento delle varie tipologie di pompa di calore:

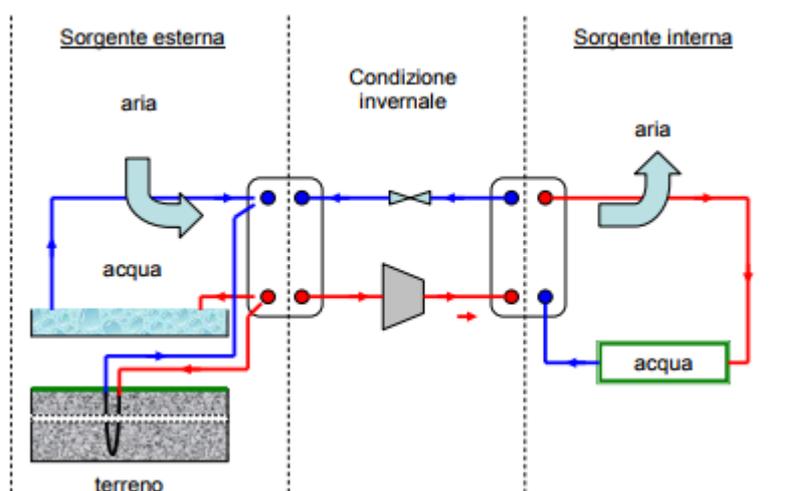


Figura 2.8: Schema di funzionamento delle varie tipologie di PdC

La classificazione che può essere fatta è la seguente:

- Pompe di calore ad aria: sfruttano il calore presente nell'aria esterna e sono la tipologia più usata, in quanto economiche e adatte per essere impiegate in zone con un clima mite, come quello italiano. Tuttavia, il maggior inconveniente sta nel fatto che la loro efficienza diminuisce quando l'aria esterna raggiunge una temperatura molto bassa. Inoltre per temperature prossime ai 0°C si deve provvedere allo sbrinamento, per evitare danni e malfunzionamenti della pompa di calore.
Le pompe di calore ad aria si suddividono a loro volta in pompe di calore aria-aria e pompe di calore aria-acqua. Le prime scambiano energia termica direttamente con l'aria dell'ambiente interno mentre le seconde hanno come fluido intermedio l'acqua. Questo sistema può funzionare anch'esso reversibilmente ed è in grado di generare sia acqua calda che acqua fredda. L'ulteriore costo dovuto all'installazione di un sistema di distribuzione dell'acqua è un punto a sfavore.
- Pompe di calore ad acqua: il fluido frigorifero scambia calore con un fluido intermedio, in questo caso acqua o acqua glicolata. Quest'ultimo scambia a sua volta calore con l'acqua superficiale appartenente a risorse idriche come fiumi, laghi o mare. Il vantaggio di questa tipologia di pompe di calore è che la temperatura della sorgente esterna è influenzata in misura minore dalle condizioni dell'ambiente esterno, con conseguente miglioramento delle prestazioni.
- Pompe di calore geotermiche: sfruttano il calore immagazzinato nel terreno o nelle acque di falda. La temperatura nel sottosuolo ha, sia in inverno che in estate, dei valori abbastanza costanti (intorno ai 14°C) e questo non può che essere positivo. Il calore viene scambiato mediante acqua che scorre all'interno di tubazioni, poste sottoterra secondo una disposizione orizzontale – configurazione con profondità moderate - o verticale – più profonda - costituita da sonde verticali che perforano il terreno.

2.2.5 Tecnologie

Come visto nel Paragrafo precedente, gli impianti di climatizzazione possono essere:

- Sistemi a espansione diretta: quando il refrigerante compie il ciclo termodinamico nella macchina termica e attraversa anche i terminali dell'impianto, scambiando direttamente con l'aria dell'ambiente interno ed esterno.
- Sistemi idronici, in cui l'energia termica è scambiata, all'interno di un *chiller*, tra fluido frigorifero e acqua, la quale raggiunge poi i terminali in ambiente.

I sistemi ad espansione diretta sono convenienti da usare quando il locale da climatizzare è di moderate dimensioni, evitando così di far percorrere lunghi tragitti al fluido frigorifero. In caso contrario (ad esempio per gli impianti di climatizzazione di navi ecc.), si può prediligere un sistema idronico, facendo in modo che sia l'acqua a servire i vari ambienti per mezzo delle unità interne come *fancoil* o ventilconvettori. Questo evita così

un grosso dispendio di energia da parte del compressore [8].

Un'altra distinzione è la seguente:

- Monoblocco: sono pompe di calore aria-acqua, in cui tutti i componenti sono racchiusi in un'unica unità esterna, collegata a sua volta, attraverso dei tubi, alle unità interne che servono ciascun ambiente, in cui circola l'acqua.
- Sistema split: è la tipologia più diffusa, caratterizzata da un'unità esterna che comprende il compressore, la valvola di laminazione e lo scambiatore di calore (evaporatore e condensatore a seconda della stagione invernale o estiva) e un'unità interna che comprende lo scambiatore di calore. Il vantaggio di questo sistema è la possibilità di installare il compressore esternamente, riducendo l'inquinamento acustico all'interno dell'ambiente (Figura 2.9 a.)³.
- Sistema Multi-split: la differenza con il precedente è che le unità interne sono in numero maggiore a uno, consentendo di servire in maniera efficiente più ambienti (Figura 2.9 b.)³.



Figura 2.9: a. Sistema Split b. Sistema Multi-Split

Tra i sistemi ad espansione diretta più usati, vi sono i sistemi VRF (*Variant Refrigerant Flow*) e VRV (*Variant Refrigerant Volume*), tecnologia con marchio della *Daikin*, la quale fu la prima al mondo a ideare e progettare questo tipo di sistema.

L'impianto è in realtà di tipo multi-split, ossia composto da un'unità esterna alla quale sono collegate, per mezzo di tubi, le unità interne che servono i vari ambienti. La novità di questo sistema è che, in base al fabbisogno termico interno di ciascun ambiente, sia in condizioni di riscaldamento che di raffrescamento, le unità interne sono regolate variando la portata di refrigerante e la velocità del compressore.

La regolazione è abbastanza articolata. Le valvole elettroniche termostatiche, presenti nelle unità interne, si aprono e si chiudono, variando così la pressione di evaporazione (in raffrescamento) o condensazione (in riscaldamento). La variazione del volume di refrigerante avviene variando la velocità di rotazione del compressore, per mezzo di un

³ www.daikin.it

inverter, che riceve un segnale dalle valvole. Per far fronte alla riduzione dell'efficienza alle basse temperature, la tecnologia ad *inverter* è in grado di aumentare la velocità di rotazione del compressore, a seguito dell'apertura delle valvole, per aumentare la portata di fluido. Al contrario, quando la temperatura esterna è alta, la tecnologia inverter è in grado di modulare la frequenza, riducendo la potenza termica necessaria per mantenere il set-point richiesto e così la portata di refrigerante circolante. Questo sistema è dunque in grado di adattare il suo funzionamento al fabbisogno termico necessario, operando anche alla minima potenza, e questo consente di ottenere un grande risparmio e un'efficienza energetica elevata, a differenza dei sistemi on-off.

2.3 Generazione fotovoltaica

2.3.1 Moduli fotovoltaici

Un modulo fotovoltaico è un assemblaggio di celle fotovoltaiche interconnesse tra loro, ciascuna formata da differenti strati di materiali semiconduttori, che permettono, grazie all'effetto fotovoltaico, la conversione della radiazione solare in energia elettrica. I vantaggi di questa tecnologia risiedono nel fatto che l'energia solare è rinnovabile e inesauribile, non vengono utilizzati combustibili fossili, riducendo così le emissioni di CO₂ e gas inquinanti e richiede inoltre una piccola manutenzione. Inoltre la potenza installata può essere incrementata connettendo insieme più moduli.

Gli svantaggi sono una efficienza ancora limitata, gli alti costi di installazione e la produzione dipendente dalle condizioni climatiche esterne. Questo induce delle variazioni giornaliere e stagionali nella produzione elettrica.

Le tipologie principali di moduli fotovoltaici sono formate da celle in:

- Silicio monocristallino: sono le celle più efficienti tra quelle disponibili in commercio, con rendimenti compresi tra il 16 e il 21%. Hanno una vita più lunga, con garanzia di circa 25 anni. Inoltre a parità di potenza elettrica prodotta, occupano uno spazio minore. Le celle in silicio monocristallino sono tuttavia costose e vengono prodotte tramite un metodo di fabbricazione chiamato "*Processo Czochralski*" che gli conferisce una tipica forma rotondeggiante.
- Silicio policristallino: il rendimento delle celle è più basso rispetto al primo caso, dell'ordine del 13-18%. Le celle in silicio policristallino presentano una forma perfettamente quadrata. Il metodo di produzione è meno costoso e semplice e non richiede il "*Processo Czochralski*". Infine ad alte temperature hanno delle prestazioni minori rispetto al silicio monocristallino.
- Thin film: sono celle ottenute attraverso un metodo di "*deposizione*" e sono distinte, in base al tipo di materiale depositato, in: Silicio Amorfo, Cadmio-Tellurio (Cd-Te), Rame-Indio-Gallio-Selenio.
- Celle multigiunzione: sono formate da differenti strati di semiconduttori, ciascuno caratterizzato da un *Energy-gap* differente che consente l'assorbimento della

radiazione a differenti lunghezze d'onda. In questo modo l'efficienza delle celle aumenta.

Durante la conversione fotovoltaica da radiazione solare in energia elettrica si verificano delle perdite dovute a [9], [10]:

- Conversione: non tutta l'energia elettrica prodotta è ceduta al circuito esterno. Le perdite sono dell'ordine del 20%.
- Effetto di ricombinazione: alcuni portatori di carica si ricombinano, a seconda della presenza di difetti nel materiale semiconduttore. Le perdite sono di circa il 2%. Quanto più puro è il cristallo – nel caso del silicio monocristallino – tanto minori sono le perdite per ricombinazione.
- Riflessione: la radiazione incidente sulla celle viene riflessa a seconda dell'indice di riflessione del materiale, per una quantità pari a circa il 10%. Per far fronte a questo problema, il materiale viene rivestito di uno strato antiriflettente, come ad esempio Diossido di Titanio.
- Contatti elettrici: perdite dovute alla presenza dei contatti metallici dal lato della cella esposta alla luce. Le perdite sono dell'ordine del 5-15%.
- Difetto o eccesso di energia dei fotoni incidenti: alcuni fotoni incidenti nella cella fotovoltaica hanno un'energia superiore o inferiore rispetto a quella richiesta per essere convertiti in energia elettrica. Quella in eccesso è dissipata sotto forma di calore (effetto Joule). Queste perdite rappresentano circa il 50%.

La curva di produzione FV, è rappresentata dalla caratteristica Corrente-Tensione, è la seguente:

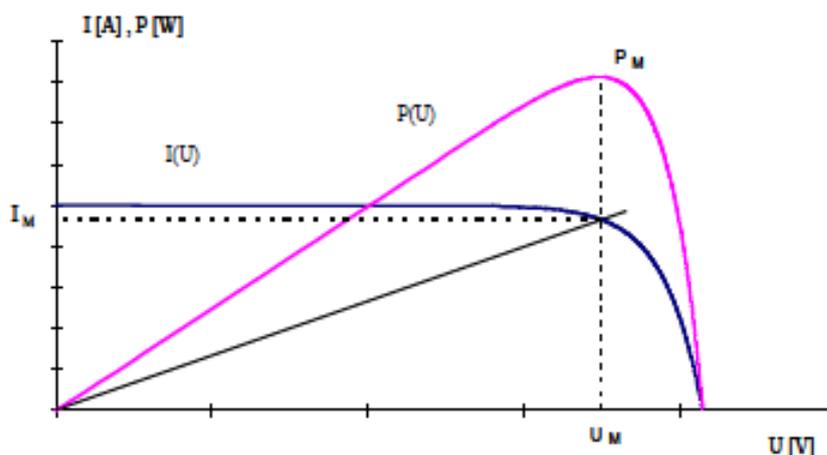


Figura 2.10: Curva di produzione fotovoltaica

I parametri corrente e tensione risultano strettamente dipendenti rispettivamente dall'Irradianza [W/m^2] e dalla Temperatura [$^{\circ}C$]. All'aumentare dell'Irradianza G , la corrente di corto circuito (I_{sc}) e quella associata alla massima potenza (I_M) aumentano linearmente, in maniera direttamente proporzionale, come mostrato in Figura 2.11. La

tensione a vuoto (U_{oc}) e la tensione associata alla massima potenza (U_M) sono influenzate lievemente e aumentano logarithmicamente all'aumentare di G .
 Complessivamente, la Potenza aumenta all'aumentare dell'Irradianza.

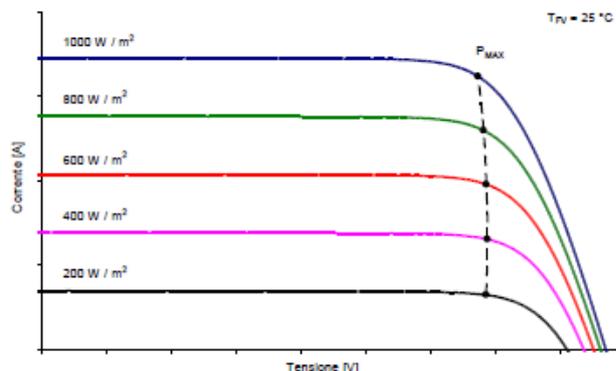


Figura 2.11: Dipendenza dei parametri corrente-tensione dall'Irradianza

All'aumentare della Temperatura invece, la tensione a vuoto e quella associata alla massima potenza diminuiscono sensibilmente di circa $-2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. La corrente di cortocircuito invece diminuisce lievemente, di $0,07\%/^\circ\text{C}$. La potenza subisce delle variazioni di circa $-0,45\%/^\circ\text{C}$. La variazione della potenza per silicio cristallino è pari allo $-0,5\%$.

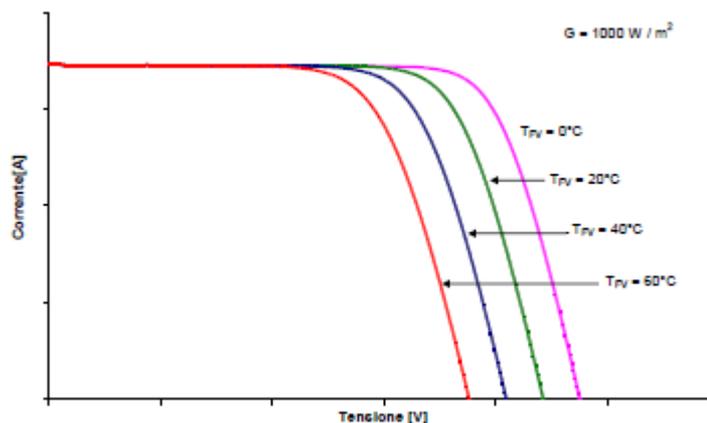


Figura 2.12: Dipendenza dei parametri corrente-tensione dalla Temperatura

I moduli fotovoltaici possono essere connessi in serie o in parallelo, influenzando la curva di produzione vista precedentemente. Le celle fotovoltaiche sono connesse in serie per formare i moduli fotovoltaici – chiamati anche pannelli. I moduli possono essere assemblati in serie per formare un “array” ossia una stringa fotovoltaica. Questa configurazione aumenta la tensione dell'impianto mentre la corrente elettrica prodotta è stabilita dal modulo con la minore corrente. I moduli possono essere anche connessi in parallelo e in questo modo la corrente in uscita dall'impianto è data dalla somma delle

single correnti attraversanti ciascun modulo. La tensione dell'impianto sarà determinata dal modulo fotovoltaico con la tensione minore.

Gli impianti fotovoltaici possono essere distinti in tre differenti tipologie:

- Impianti autonomi o "*stand alone*": sono scollegati dalla rete elettrica e fanno affidamento esclusivamente sull'energia elettrica prodotta per mezzo della radiazione solare incidente sui moduli. Negli impianti *stand alone*, un ruolo fondamentale è ricoperto dagli accumulatori elettrochimici. Sono dei generatori di tensione costante, che impongono la propria tensione all'intero generatore fotovoltaico.
- Impianti connessi alla rete o "*grid connected*": sono impianti collegati alla rete elettrica che, in assenza di produzione fotovoltaica, coprono i consumi elettrici dell'utenza attraverso il prelievo dalla rete elettrica.
- Impianti ibridi: sono impianti che producono energia elettrica non soltanto tramite i moduli fotovoltaici ma grazie ad altre fonti sia fossili o rinnovabili, connessi alla rete elettrica e dotati di sistema di accumulo.

Gli impianti fotovoltaici devono far fronte alla riduzione della potenza elettrica prodotta indotta dall'effetto di ombreggiamento di ostacoli circostanti o delle file di moduli stessi.

2.3.2 Autoproduzione e autoconsumo

In tempi in cui la corsa sfrenata al fotovoltaico ha subito un calo a causa della scomparsa delle tariffe incentivanti per la produzione di energia elettrica, i meccanismi odierni di remunerazione dell'energia elettrica prodotta non valorizzano appieno la produzione dell'impianto fotovoltaico. Per chi vuole installare un impianto o ne possiede già uno risulta dunque più conveniente cercare di massimizzare il consumo della quota di energia prodotta, riducendo al minimo gli scambi con la rete. L'energia elettrica prelevata dalla rete possiede infatti un costo maggiore rispetto a quella prodotta, pari a circa 20-30 centesimi di euro a kWh. Inoltre l'immissione in rete comporta un guadagno minore, circa 0,14 Euro a kWh prodotto.

L'autoconsumo istantaneo è il meccanismo che consente di sfruttare al meglio l'investimento fatto con l'acquisto dell'impianto, adeguando eventualmente il comportamento dei carichi elettrici alla logica di maggiore sfruttamento della produzione. Questo potrebbe aprire nuove strade e rendere comunque competitivo il fotovoltaico, attraverso una gestione efficiente della produzione e della domanda.

L'Autoconsumo (o *Self Consumption*) rappresenta la quota di potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico, impiegata per coprire i consumi elettrici dovuti all'utilizzo di apparecchiature elettriche ed elettrodomestici, dei sistemi di climatizzazione con pompa di calore, ecc.

Viene dunque definito come:

$$AC [\%] = \frac{Min[P_{FV}; C_e]}{P_{FV}} \quad (2.17)$$

Dove, P_{FV} rappresenta la potenza elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico [kW] e C_e il consumo elettrico espresso in kW.

Tuttavia, l'autoconsumo non è il solo parametro in grado di stabilire la qualità di accoppiamento tra produzione di energia elettrica e carichi elettrici. Facendo un esempio, in una giornata nuvolosa o in condizioni meteorologiche non favorevoli, si può supporre che la potenza elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico in un dato istante sia di 400 W, e che la potenza elettrica richiesta sia di 900 W. In questo caso, pur avendo un autoconsumo istantaneo del 100%, il fotovoltaico non è capace di coprire i consumi elettrici.

Per tenere conto di ciò, entra in gioco un secondo parametro, definito *Autoproduzione o Autosufficienza*. Viene espresso come:

$$AP [\%] = \frac{Min[P_{FV}; C_e]}{C_e} \quad (2.18)$$

L'autosufficienza o autoproduzione rappresenta la quota di consumi elettrici coperti effettivamente dalla produzione fotovoltaica. Quindi, riferendoci all'esempio precedente, l'auto-produzione è pari allo 0,44%.

Per ovviare a situazioni come queste, in cui la sola produzione fotovoltaica non è in grado di sopperire alla richiesta di energia, si può ricorrere al sistema di accumulo.

Come si può osservare nella Figura 2.13, l'energia prodotta – data dalla somma dell'area in verde scuro e verde chiaro – può essere consumata istantaneamente, secondo la logica dell'autoconsumo istantaneo oppure accumulata nelle batterie. Se in eccesso nelle batterie può essere immessa e così venduta alla rete.

In relazione al grafico, si possono definire i seguenti parametri in riferimento alla produzione elettrica fotovoltaica:

$$E_{FV} = AC_e + I \quad (2.19)$$

Dove E_{FV} è l'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico [kWh], AC_e la quota di energia auto-consumata, ossia la quota di energia prodotta utilizzata per coprire i consumi elettrici [kWh], I è la quota di energia immessa nella batteria o nella rete elettrica espressa in kWh.

In riferimento invece all'energia elettrica consumata si definiscono:

$$E_c = AP_e + P \quad (2.20)$$

Dove E_c è l'energia elettrica richiesta dall'utenza [kWh], AP_e la quota di energia autoprodotta, ossia la quota di energia richiesta dall'utenza e coperta dalla produzione fotovoltaica [kWh], P è la quota di energia prelevata dalla batteria o dalla rete elettrica espressa in kWh.

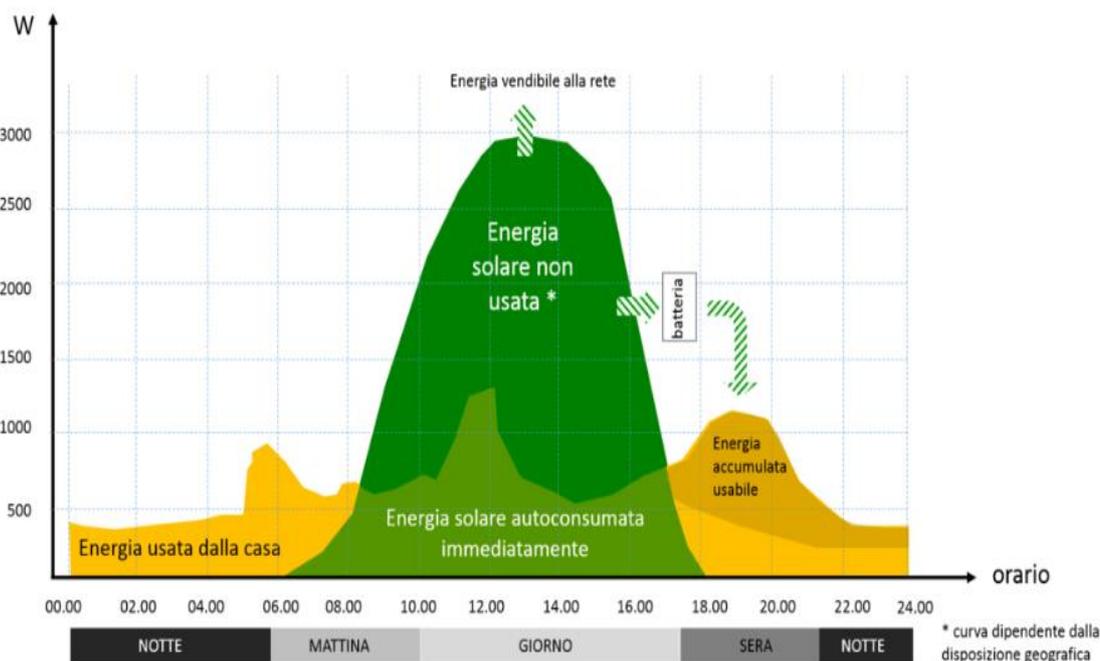


Figura 2.13: Meccanismi di produzione e richiesta di energia

Si possono dunque definire in termini energetici le quantità $\frac{AC_e}{E_{FV}}$ e $\frac{AC_e}{E_c}$ che rappresentano rispettivamente l'autoconsumo e l'autoproduzione espresse in %, definite precedentemente in (2.17) e (2.18).

In momenti di maggiore produzione, il surplus di energia che verrebbe invece direttamente immessa in rete, può essere immagazzinata e prelevata in momenti in cui la produzione non riesce a compensare la richiesta. Con questo meccanismo, il sistema di accumulo permette di far fronte all'assenza di perfetto sincronismo tra produzione e consumi e aumentare la quota di energia auto-consumata. In questo caso si parla di *autoconsumo differito*.

Gli accumulatori servono dunque per garantire una continuità del servizio, in periodi in cui la produzione fotovoltaica non è sufficiente per soddisfare la richiesta di energia elettrica. Generalmente gli accumulatori sono di tipo elettrochimico e la loro presenza migliora la producibilità dell'impianto fotovoltaico in quanto impongono la tensione di

lavoro di tutto il sistema, collocata nel “range” di massima potenza dell’impianto fotovoltaico.

Lo scambio sul posto (SSP) consente invece di vendere quell’eccesso di energia che non si consuma o non si riesce a immagazzinare con le batterie. In questo senso risulta conveniente ma non dovrebbe essere l’unica opzione attuabile. Questo perché il rimborso dell’energia venduta alla rete è inferiore rispetto al prezzo di acquisto dell’energia dalla rete stessa. Il rimborso non avviene tramite sgravio sulla bolletta ma attraverso dei pagamenti effettuati dal gestore dei servizi energetici (GSE) a cadenza trimestrale.

L’uso di sistemi di riscaldamento elettrico, come la pompa di calore, potrebbe far alzare i consumi elettrici, ma allo stesso tempo, se provvisti di impianto fotovoltaico potrebbe rendere fruttuoso l’investimento e far aumentare la quota di energia auto-consumata, evitando così sprechi energetici. L’energia immessa in rete, come detto prima, non viene valorizzata adeguatamente dunque conviene sempre utilizzarla il più possibile.

2.3.2.1 Configurazione impianti con sistema di accumulo

Una tipica configurazione con sistema fotovoltaico e accumulo, con connessione alla rete di distribuzione è mostrata in Figura 2.14, secondo quanto stabilito dalla normativa CEI 0-21 [11].

A valle del generatore fotovoltaico, è presente un convertitore DC-DC che consente di innalzare la tensione a un livello opportuno. Successivamente si trova un convertitore DC-AC, comunemente chiamato inverter, il quale permette la conversione da valori di correnti e tensioni continue in alternate.

Il sistema di accumulo può avere varie tipologie di connessione con l’impianto fotovoltaico. Può essere posto a monte dei due convertitori e dunque operare in corrente alternata o, come nell’esempio citato, può essere inserito a monte dell’inverter. In questo ultimo caso il sistema di accumulo costituisce una sorgente in corrente continua.

In tale configurazione, oltre agli elementi sopra descritti, sono presenti due contatori, finalizzati a misurare i flussi energetici in uscita o in entrata nel sistema.

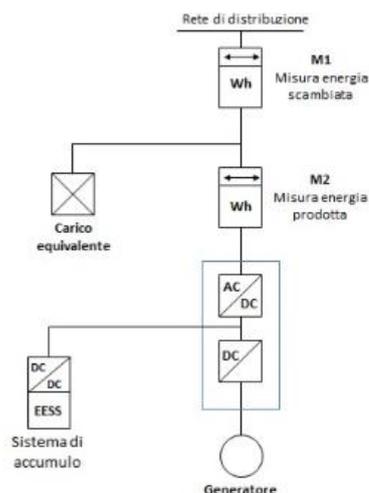


Figura 2.14: Esempio di configurazione con accumulo secondo la normativa CEI 0-21

Questa configurazione rappresenta una modalità operativa della generazione distribuita di tipo *net-metering*, in cui il sistema è sempre connesso sia al carico che alla rete elettrica e la generazione locale può anche eccedere il carico. Il flusso di energia può avvenire in entrambe le direzioni, da e verso la rete esterna. Per tale ragione si rende necessaria una misura separata dei flussi di potenza per poter effettuare delle valutazioni di tipo economico. Il contatore a valle dei convertitori è un contatore di tipo M2, noto anche come contatore di produzione, in quanto misura l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico. Il secondo contatore, di tipo M1, è quello di scambio e conteggia invece l'energia che viene appunto scambiata con la rete, sia in prelievo che in immissione. Per questo motivo è noto anche come contatore bidirezionale. Tale contatore è fondamentale in un'analisi di tipo economico per valutare il reale prelievo dalla rete.

Un corretto meccanismo di funzionamento del sistema è quello che permette dapprima il consumo dell'energia prodotta e poi l'eventuale prelievo dalla rete.

2.3.2.2 Bolletta Elettrica e Fasce orarie

L'autoconsumo - sia istantaneo che differito - consente di ottenere dei notevoli risparmi, in quanto permette di minimizzare i prelievi dalla rete e abbattere quindi i costi della bolletta elettrica. Bisogna specificare inoltre che il costo associato alla bolletta è comprensivo non soltanto del prezzo di mercato associato all'energia elettrica acquistata dalla rete ma anche di una serie di oneri di sistema e imposte.

La bolletta comprende principalmente due importi di fatturazione [12]:

- Spese per la materia energia: riguarda il costo delle attività effettuate dal venditore per fornire energia elettrica all'utente finale. Comprende il costo della quota di energia che viene prelevata dalla rete, il costo per il suo dispacciamento, ecc.

- Servizi di rete: sono i costi relativi alle attività per il trasporto dell'energia elettrica, e alla gestione del contatore. A ciò vengono aggiunte l'imposta sul consumo (accisa) e gli oneri.

Immettendo in rete l'energia elettrica prodotta, viene pagato il corrispettivo associato al prezzo dell'energia di mercato e ad alcuni servizi di rete, ad esclusione delle imposte. È chiaro come è più conveniente auto-consumare l'energia, evitando prelievi ed immissioni. Inoltre, bisogna tenere conto delle fasce orarie in cui avviene l'eventuale prelievo. Le fasce orarie prese in considerazione dai contatori sono tre e vengono suddivise secondo il criterio in cui c'è maggiore o minore richiesta di energia.

La Fascia F1 si riferisce agli orari in cui c'è maggiore richiesta di energia, ossia agli orari di punta e dunque presenta un costo dell'energia elettrica più alto. Comprende l'orario dalle 8:00 alle 19:00 dal Lunedì al Venerdì, per i giorni feriali, ad esclusione delle festività.

La Fascia oraria F2 (ore intermedie) riguarda i momenti in cui c'è una moderata richiesta di energia. Va dal Lunedì a Venerdì, dalle 7:00 alle 8:00 e dalle 19:00 alle 23:00 e il Sabato dalle 7:00 alle 23:00.

La Fascia oraria F3, riguarda invece gli orari in cui c'è una minore richiesta di energia e quando l'energia elettrica ha un costo minore. Comprende i giorni dal Lunedì al Sabato dalle 23:00 alle 7:00 e tutte le 24 ore della domenica e dei festivi.

Le Fasce orarie possono essere distinte diversamente in termini di fatturazione sulla bolletta elettrica. Per casi in cui vi è un riscaldamento elettrico con pompa di calore, è prevista una tariffa dedicata, denominata TD, di tipo biorario⁴, distinta in una fascia oraria F1, come sopra, e F23, comprensiva della fasce orarie di F2 e F3, con costi di servizi di rete indipendenti dal consumo. Un esempio di tariffa è mostrata nelle seguenti figure, rispettivamente per le spese per la materia energia, in Figura 2.15, e i servizi di rete, in Figura 2.16.

Quota fissa	Per ogni mese del trimestre	€/cliente/mese	3,578800
Quota energia	Energia F1	€/kWh	0,084260
	Energia F23	€/kWh	0,073210

Figura 2.15: Dettaglio spese per la materia energia - Tariffa TD

⁴ www.servizioelettriconazionale.it

		Spesa trasporto gestione contatore	Spesa oneri di sistema
Quota fissa	€/cliente/mese	1,610000	0,000000
Quota potenza	€/kW di potenza impegnata/mese	1,774500	0,000000
Quota variabile	€/kWh	0,007860	0,040523

Figura 2.16: Dettaglio spese per i servizi di rete - Tariffa TD

Con la presenza dell'impianto fotovoltaico, l'autoconsumo produrrebbe dei risparmi maggiori se si cercasse di consumare ciò che si è prodotto nella fascia oraria a cui corrisponde il costo di energia elettrica più alto, ossia la fascia oraria F1. Questo consentirebbe dunque di abbattere i costi della bolletta evitando di prelevare dalla rete proprio nelle ore di punta.

Capitolo 3

3 Efficienza Energetica dei moduli abitativi

L'efficienza energetica negli edifici costituisce uno dei temi più importanti dinnanzi al problema delle emissioni di gas inquinanti e dei cambiamenti climatici. La crescita della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera porterà infatti a un aumento della temperatura globale di 5°C entro il 2100 [13].

Gli edifici incidono per una quota pari al 40% sul consumo totale di energia e sono responsabili del 36% delle emissioni totali di CO₂ in Europa [13] [14].

Con la strategia 20-20-20 – definita anche pacchetto Clima-Energia – l'Unione Europea si era già posta degli obiettivi specifici e ambiziosi sulla riduzione delle emissioni e dei consumi energetici entro il 2020, nonché l'aumento dell'efficienza energetica e dello sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili. In seguito, con l'emanazione della nuova Direttiva Europea 2010/31/UE sulle prestazioni energetiche degli edifici (*Energy Performance Building Directive, EPBD*) e del recepimento della stessa in Italia secondo la Legge 90/2013, è stato indicato il concetto di *Nearly Zero Energy Building (NZEB)*. La definizione di base secondo la direttiva EPBD, non univoca e a discrezione di ciascun paese membro, è la seguente:

“Un edificio ad altissima prestazione energetica. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze”.

In questa ottica, ci si impegna a realizzare nuovi edifici a energia quasi zero entro il 31 Dicembre 2020 e nuovi edifici pubblici entro il 31 Dicembre 2018.

Essendo dunque l'edilizia uno dei settori più energivori e impattanti per l'ambiente, costituisce dunque il mercato più importante sul quale focalizzare l'impegno per il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni di CO₂, offrendo la possibilità di ridurre di circa il 40% le emissioni di gas inquinanti [13].

L'aumento dell'efficienza energetica negli edifici non riguarda soltanto la riduzione dei consumi di energia durante la fase di utilizzo – quella che è definita come *operational energy* – ma un intervento dalla fase di costruzione alla fase di smaltimento – quella che è definita *embodied energy*. Per realizzare concretamente un'elevata efficienza energetica, tutto il ciclo di vita dell'edificio, *“from cradle to grave”*, assume una importanza basilare, anche in termini di impatto sull'ambiente ed emissioni.

La realizzazione di edifici ecosostenibili o il retrofit di edifici già esistenti diventa una scelta prioritaria. L'intervento su edifici già esistenti, risulta un'opzione interessante ma non priva di ostacoli, a causa della moltitudine di fattori e delle problematiche implicate in questo processo. Inoltre, la questione si fa ancora più difficoltosa se ad essere coinvolti sono edifici di stampo molto vecchio. La maggior parte di essi, infatti, sono stati costruiti con riferimento alle normative e standard del tempo o seguendo criteri di cui non si hanno informazioni precise. A conferma di ciò, uno studio condotto nel 2011 dal *Performance Institute Europe di Brussell* rende noto che l'intervento sugli edifici di vecchia data presenta il più basso risparmio energetico attraverso operazioni di ristrutturazione [15].

Per raggiungere i requisiti di alta efficienza energetica occorre considerare:

- Un adeguato isolamento termico: un buon isolamento garantisce dei bassi consumi sia per riscaldamento che per raffrescamento grazie alla riduzione delle dispersioni verso l'esterno. Gli edifici non sostenibili dissipano verso l'esterno metà dell'energia prodotta al loro interno, emettendo un grosso quantitativo di CO₂. Aumentando o introducendo un corretto isolamento termico si ha un risparmio sia in termini energetici che in termini di emissioni, prodotte dagli impianti di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria (ACS).
- Sistema HVAC e sistemi di recupero del calore: l'aria fresca proveniente dall'ambiente esterno assorbe calore dall'aria esausta uscente dall'ambiente interno, attraverso uno scambiatore di calore. In questo modo si riesce a recuperare fino all'80-90% del calore, permettendo così una compensazione dell'energia consumata per la ventilazione meccanica. La ventilazione è in grado di uniformare le temperature dei vari ambienti, recuperando calore nelle stanze generalmente più calde come cucina, bagno, ambienti più affollati, ecc.
- Elettrodomestici e apparecchi elettrici ad alta efficienza in grado di minimizzare i consumi energetici ed elettrici. Questi, possono essere interconnessi tra loro per mezzo di un sistema "smart" in grado di gestire ottimamente il loro funzionamento – si parla di programmabilità – e ridurre così i consumi elettrici. Tale sistema è stato implementato da differenti aziende ed è reso disponibile tramite un software. Si sta continuando a lavorare per garantire all'utente una gestione e controllo degli apparecchi anche a distanza, consentendo un ulteriore risparmio energetico [16].
- Fonti Rinnovabili e sistemi di accumulo: l'energia, sia termica sia elettrica, può essere prodotta in loco da fonti di energia rinnovabile come il solare termico, solare fotovoltaico, mini eolico, pompe di calore, ecc. Qualora la produzione risulti minore, si ricorre al sistema di accumulo. Grazie a questo ci si può avvicinare all'aspirazione che la casa possa produrre più di quanto consumi.
- Materiali ecosostenibili e riciclabili: per essere sostenibile ed efficiente, l'edificio deve essere realizzato utilizzando materiali riciclati e a loro volta riciclabili. In questo modo si impatta in misura minore sull'ambiente, consentendo la riutilizzabilità dei materiali e riducendo ulteriormente le emissioni di CO₂. Si tratta del concetto "cradle to cradle", letteralmente dalla culla alla culla, ad indicare il fatto che il materiale, al termine del suo ciclo di vita, viene impiegato in un nuovo processo produttivo. A tale proposito, alcune aziende statunitensi hanno prodotto dei muri a secco per gli interni, composti dall'80% di materiali riciclati. Altre,

hanno cercato di trasformare il problema delle emissioni di CO₂, realizzando prodotti in calcestruzzo – i più inquinanti – in grado, attraverso un processo fotocatalitico ispirato alle piante, di assorbire la CO₂ quando esposti alla luce solare [16].

L'avvento delle fonti rinnovabili ha introdotto altri importanti temi e problematiche quali la loro integrazione nella rete elettrica e le *smart grid*. Sta cambiando inoltre il modo di concepire l'utente, il quale non è più consumatore ma attivo produttore. L'edificio diventa così una piccola centrale di produzione di energia ed ecco che avvicinarsi agli standard della casa passiva e dei *Nearly Zero Energy Building* diventa essenziale in questa ottica.

Tra vari materiali eco-compatibili si sta facendo spazio il legno, flessibile, sicuro strutturalmente e altamente sostenibile. Rispetto agli altri materiali disponibili sul mercato, il legno sembra essere quello più in linea con il rispetto dell'ambiente in tutta la sua catena produttiva, iniziando da una gestione responsabile delle foreste. Sta assumendo dunque un ruolo chiave nell'Architettura, grazie alle sue caratteristiche rinnovabili, eco-compatibili e naturali. Anticamente, il legno era il principale materiale usato nel campo dell'edilizia. In seguito messo da parte a causa di problemi di durabilità, in quanto esposto a intemperie ed agenti atmosferici, oggi sta avvenendo una sua riscoperta e rivalutazione.

Negli ultimi anni, un altro concetto si è affacciato nella scena dell'innovazione: la mobilità. In maniera sempre crescente, sia per motivi lavorativi che per nuovi stili di vita, essa è diventata una delle esigenze a cui il mondo della ricerca e in particolar modo dell'Architettura, ha cercato di fornire nuove soluzioni. È nato quindi un nuovo modo di intendere l'edificio. Dovendo soddisfare i requisiti di sostenibilità ed efficienza energetica precedentemente descritti, si è pensato di unire questi nuovi temi per dar vita a strutture prefabbricate e in particolar modo a moduli abitativi. Il concepimento di una tale struttura ha preso ispirazione dai container, usati per il trasporto delle merci, sia via terra che via mare. I container erano già stati usati in situazioni di emergenza, laddove, in seguito a calamità naturali, venivano impiegati come alloggio temporaneo. La loro struttura è resistente e robusta, di elevata durabilità ed economica. Tuttavia, essendo strutture prettamente in acciaio, devono essere opportunamente isolate per evitare sbalzi termici elevati e la concentrazione di umidità. Si è pensato così, non di riciclare queste strutture ma di adoperarne di nuove, utilizzando materiali a basso impatto ambientale, sostenibili e leggeri, tra cui proprio il legno. La prefabbricazione e l'efficienza energetica sono alla base della costruzione moderna.

3.1 Repertorio di moduli abitativi prefabbricati

3.1.1 M.A.D.I.

M.A.D.I., acronimo di modulo abitativo dispiegabile, costituisce un esempio di struttura prefabbricata made in Italy. Ideato dall'architetto Renato Vidal in collaborazione con l'azienda abruzzese Area Legno è dispiegabile, flessibile e facilmente trasportabile. Identificato anche con il nome di "casa pieghevole" il modulo abitativo M.A.D.I., ha una struttura principale in legno lamellare con pareti coibentate in lana di roccia. La copertura è realizzata in legno XLAM [17]. La peculiarità di essere richiudibile gli viene conferita dalle cerniere in acciaio zincato a caldo, che permettono l'apertura e la chiusura della struttura. I tempi di installazione in questo modo vengono ridotti drasticamente, stimabili in circa due giorni lavorativi. Si rivela particolarmente utile nei casi di emergenza e calamità naturali e possiede a tale proposito una certificazione antisismica. Nonostante la sua resistenza ai disastri naturali, la struttura può essere usata anche a scopo residenziale, per attività di tempo libero, ecc. Dispiegando la struttura, il volume occupato è circa il triplo rispetto a quello occupato quando il modulo è ripiegato.

La casa raggiunge una classe energetica A (o superiore) su richiesta del cliente e i moduli fotovoltaici installati sul tetto la possono rendere una struttura completamente autonoma dal punto di vista energetico. Inoltre, più strutture possono essere assemblate tra loro in modo da formare un'unica struttura modulare. Un'altra caratteristica è che non sono richieste fondazioni. Il modulo abitativo è saldato sul terreno attraverso un sistema di fondazioni a vite, sostenibile e non impattante.



Figura 3.1: Modulo abitativo MADI

3.1.2 IT House

Questa tipologia di modulo è stata elaborata da Taalman Koch e si distingue per essere completamente autonoma dalla rete, installata per la prima volta nel deserto a dimostrazione della sua autonomia e funzionalità. E' costituita infatti da un sistema di moduli fotovoltaici e solari termici, atti a produrre energia elettrica e acqua calda sanitaria. La struttura prefabbricata segue lo standard energetico di una casa passiva, che richiede un fabbisogno di energia termica pari a 15 kWh/m² all'anno. Questa tipologia di casa permette di ridurre i consumi energetici, sfruttando gli apporti di calore solari e interni – generati dalla presenza di occupanti, elettrodomestici e altri tipi di apparecchi – che riescono a compensare le dispersioni verso l'esterno durante la stagione fredda. L'energia solare è sfruttata al meglio grazie alle ampie vetrate che si estendono lungo le pareti dell'edificio. Il sistema di ventilazione meccanica presente è a recupero di calore.

Il modulo è caratterizzato quindi da un sistema di riscaldamento e raffrescamento passivo, da una orientazione studiata e attenta, con opportune schermature e aggetti per proteggere l'edificio dal caldo e posizionamento di porte e finestre dal lato più fresco e ventilato. Un elemento di schermatura è posto sul lato Ovest per evitare che la casa si riscaldi con il sole del pomeriggio e il vetro della finestra esposta a Est risulta invece opaco per tutelare la casa al mattino. La struttura è realizzata in alluminio, una copertura in acciaio, ampie porte in vetro scorrevoli lungo le facciate con telaio in alluminio. Tutti i componenti sono stati prefabbricati, ossia realizzati “*off site*” e assemblati sul posto. Non è presente alcuna saldatura ma gli unici elementi di fissaggio sono dei bulloni in acciaio inossidabile [18].

La casa è costituita da una elevata efficienza energetica. Per ridurre al minimo il consumo sono utilizzati dei pavimenti radianti e apparecchi ad alta efficienza energetica. I moduli fotovoltaici si integrano bene con la struttura e fanno anche da schermi per la copertura. D'estate invece, gli apporti di calore gratuiti sono smorzati grazie agli aggetti schermanti e vetri opachi.



Figura 3.2: IT House

3.1.3 KODA

Questo modulo abitativo è stato progettato dall'azienda estone Kodasema, fondata nel 2014 e presenta delle dimensioni abbastanza contenute, essendo un cubo con superficie di 25 m². Questo lo rende adatto ad essere trasportato ovunque, permettendo immediatamente una facile progettazione e realizzazione. Non presenta inoltre fondamenta quindi una volta installato, può essere facilmente smontato e ritrasportato in un altro luogo. Ogni componente del modulo è infatti prefabbricato e dunque può essere assemblato in loco, risparmiando tempo e denaro. La struttura è realizzata in materiali eco-compatibili, principalmente in calcestruzzo e legno, connessi da fasci in fibra di vetro. Il sistema risulta totalmente al riparo dagli agenti esterni, grazie alla struttura a vetri quadrupli e ai pannelli isolanti sottovuoto in calcestruzzo. In questo modo l'ambiente rimane caldo nella stagione invernale e fresco nella stagione estiva. Può ospitare al massimo una/due persone ma al suo interno è presente tutto lo stretto necessario per vivere. È essenziale, con colori chiari con ispirazione allo stile *minimal scandinavo*. Il sistema di moduli fotovoltaici integrati nella copertura, un sistema intelligente di illuminazione LED e riscaldamento, l'impianto di ventilazione meccanica, le ampie vetrate per sfruttare al massimo gli apporti solari lo rendono un modulo ad alta efficienza energetica, che produce energia più di quella che consuma. I tempi di assemblaggio sono di un giorno e inoltre possono essere assemblati più moduli. Può essere adibita ad ufficio, temporary shop, caffetteria, sala studio o casa studenti [19].



Figura 3.3: Modulo abitativo KODA

3.1.4 Casa GG

Nell'ambito del concorso *Self Sustained Module*, il cui obiettivo era la progettazione di un modulo prefabbricato sostenibile, ad elevata efficienza energetica e con bassi costi e tempi di realizzazione e trasporto, la *Casa GG*, elaborata da un team spagnolo, è risultata la vincitrice. Questa struttura è caratterizzata da sei moduli in legno d'abete, disposti a "tentacolo" – per una superficie di 112 m² - all'interno di un bosco. Questa configurazione è stata scelta per non recidere la vegetazione circostante e per integrarsi in maniera armoniosa con essa. I sei moduli sono collegati tra loro da delle strutture vetrate, funzionanti da serra in inverno e adibite a spazi come librerie. La struttura è prettamente in legno e ben coibentata grazie alla cellulosa e una lamina impermeabile traspirante. Per il riscaldamento è presente un radiatore da 1 kW, acceso solo per due ore al giorno in quanto si cerca di sfruttare il più possibile gli apporti solari gratuiti, grazie anche a un orientamento corretto del modulo [20].



Figura 3.4: Casa GG

3.1.5 ZeroHouse

Benché sia ancora un prototipo, la ZeroHouse, progettata dall'architetto Scott Specht, è un esempio interessante di modulo prefabbricato e completamente autosufficiente. Possiede un'area di 200 m², che può ospitare al massimo quattro persone. È altamente efficiente grazie ai moduli fotovoltaici posti sul tetto e al sistema di accumulo. In assenza di radiazione solare può avere un'autonomia fino a 100.000 ore di utilizzo continuo, partendo da batteria carica. La casa raccoglie l'acqua su una cisterna di oltre 10 m³, posta sul tetto, e il peso stesso dell'acqua permette il pompaggio nelle tubature. Dunque non è richiesto l'uso di pompe elettriche. Presenta un sistema di compostaggio in grado di riciclare i rifiuti organici e trasformarli in fertilizzante, e per questo non è necessario allacciarla a un sistema di scarico. Il sistema di fissaggio al terreno non è invasivo, caratterizzato da quattro punti di ancoraggio elicoidali. E' facilmente trasportabile e

rimovibile e può rimanere inabitata per periodi lunghi grazie a un sistema di ibernazione controllata. Tutti i sistemi sono gestiti in maniera efficiente grazie a un dispositivo intelligente che può essere controllato direttamente da PC. I vetri sono tripli e basso emissivi e le porte esterne sono formate da pannelli aero gel sottovuoto.



Figura 3.5: ZeroHouse

Capitolo 4

4 Il modulo abitativo *eco>Home*

4.1 Il concetto *eco>Home*

Questo nuovo concetto è stato sviluppato da *be-eco*, una startup che si occupa di sviluppare soluzioni costruttive a basso impatto ambientale, operante all'interno dell'Incubatore di Imprese Innovative del Politecnico di Torino I3P.

Eco>Home è una nuova tipologia di struttura, il cui nome suggerisce come alla base della sua ideazione ci siano tre temi chiave: eco sostenibilità, risparmio energetico e comfort. Questo è dovuto al fatto che la struttura è costruita con materiali rinnovabili, accuratamente scelti nel rispetto dell'ambiente, all'insegna di minori emissioni di CO₂ ma senza che questo comporti una riduzione del comfort [21].

Il legno è il materiale protagonista in quanto possiede una varietà di pregi che lo rendono adatto per essere impiegato in queste nuove strutture ed è inoltre certificato PEFC (*Programme for Endorsment of Forest Certification*TM). La certificazione PEFC attesta come le foreste, da cui provengono i materiali legnosi utilizzati, in particolare austriache, siano state gestite sostenibilmente e con responsabilità, evidenziando come la fase di raccolta sia stata eseguita in un'ottica di tutela dell'habitat e di tutte le specie animali e vegetali che ci vivono. Questo consente di realizzare un perfetto equilibrio tra taglio e crescita delle aree forestali, attuato sia naturalmente sia attraverso un processo di continuo rimboschimento. Si crea così una stabilità tra CO₂ presente nell'aria e assorbita dagli alberi e l'ossigeno emesso, che porta a una riduzione delle emissioni. Questo materiale è ecosostenibile non solo perché proveniente da foreste certificate ma perché è uno dei pochi che presenta il minore impatto ambientale nella sua filiera produttiva e durante il suo trasporto.

La tipologia di legno utilizzata è quella lamellare, chiamata anche legno ingegnerizzato. Il legno lamellare è un materiale composito, ottenuto dall'unione di più tavole di legno, precedentemente essiccate, dette appunto lamelle⁵. Le travi ottenute presentano quindi un'elevata resistenza meccanica, conferitagli dall'utilizzo di colle sintetiche per l'assemblaggio. Il legno lamellare dona al modulo abitativo un'elevata stabilità e robustezza, rendendolo adatto a resistere ai terremoti, ispirandosi ai modelli architettonici del Giappone, paese esperto fin dagli anni '30 nella realizzazione di strutture antisismiche.

⁵ www.illegnolamellare.it

La struttura è stata testata presso i laboratori Giapponesi, attestando una resistenza di 1,25 volte maggiore rispetto all'ultimo terremoto registrato⁶.

È ancora di origine giapponese il *Suteki Wood System*, il sistema di connessione impiegato nel modello *eco>Home* che permette di assemblare travi e pilastri attraverso giunzioni in acciaio al carbonio. I bulloni non vengono utilizzati e questo consente che, dinanzi ad un'eventuale compressione o dilatazione della struttura, essi non cedano sotto il peso degli sforzi meccanici. L'acciaio al carbonio è infatti un materiale molto resistente alle fratture e questo conferisce alla struttura non solo resistenza ma anche estrema flessibilità. Essendo prefabbricata, la sua realizzazione è di elevata efficienza e rapidità. I materiali e tutti i componenti della struttura possono essere testati ancor prima che essa venga assemblata e i tempi di realizzazione si riducono, andando da giorni a poche settimane. Inoltre, alla fine del suo utilizzo, il modulo abitativo può essere smontato e facilmente riciclato. Un'altra caratteristica è la sua flessibilità progettuale in quanto il cliente può personalizzare secondo le sue esigenze il progetto e decidere di apportare delle modifiche⁷.

Il modulo *eco>Home* possiede buone proprietà di isolamento termico e controllo dell'umidità, contribuendo a una riduzione dei consumi energetici e al mantenimento della temperatura desiderata all'interno dell'ambiente. I ponti termici e le infiltrazioni di aria sono ridotte, permettendo a chi ci abita di vivere in un ambiente salubre e confortevole. Infine la resistenza a fuoco del legno lamellare permette di tutelare l'edificio da eventuali incendi, impedendo che gli strati più profondi possano essere soggetti a combustione. Lo sfruttamento degli apporti di calore solari avviene grazie alle ampie vetrate disposte lungo le diverse facciate e a un corretto orientamento della struttura verso sud/sud-est. Al modello possono essere integrate varie soluzioni che consentono di raggiungere un'elevata efficienza energetica e di ridurre i consumi per riscaldamento e raffrescamento, quali pompe di calore e l'utilizzo di fonti rinnovabili come i moduli fotovoltaici. Della tipologia *eco>home* esistono vari modelli: *eco>Home PLUS*, *eco>Home ZERO* e *eco>Home NATURE*. Essi si differenziano per la classe energetica a cui appartengono e la certificazione energetica posseduta, che li avvicinano o meno al tanto auspicato modello NZEB.

4.2 Il modulo

Nell'ottica di un'architettura sostenibile volta al risparmio e al basso impatto ambientale, il modulo abitativo *eco>Home* nasce come penitenzieria in occasione dell'ostensione della Sacra Sindone a Torino, nell'Aprile 2015. L'involucro, di tipo prefabbricato e realizzato prettamente in legno, si configura come una semplice struttura a parallelepipedo di 11x6x3 m, con finestre con telaio in legno a doppi vetri, una per ciascuna delle quattro

⁶ www.eco-home.it/sistema-costruttivo

facciate e con una superficie aggettante dal lato dell'ingresso. La planimetria è riportata di seguito in Figura 4.1.

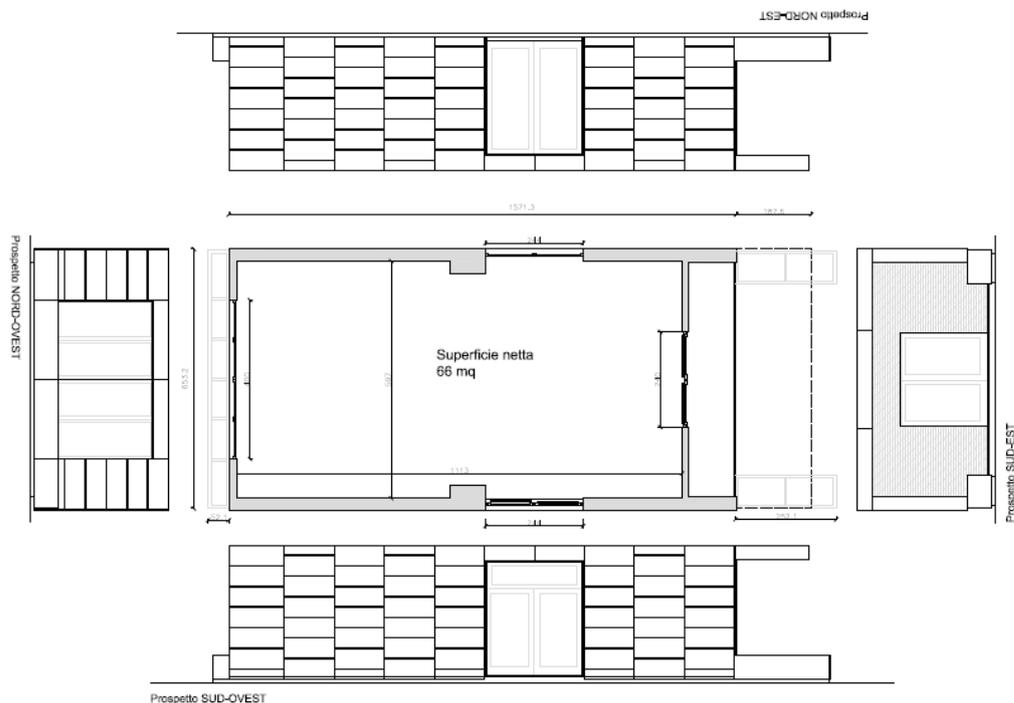


Figura 4.1: Planimetria modulo *eco>Home*

Il progetto, sviluppato dalla start-up *be-eco* ha visto il coinvolgimento e la collaborazione di circa 19 aziende. Il legno con cui è stata realizzata la struttura possiede la certificazione forestale PEFC. Il modulo, di classe energetica A, ha acquisito inoltre la certificazione Itaca (Istituto per l'Innovazione e la Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale) come edificio non residenziale, con un totale di 3 punti su 5. Tale protocollo attesta l'efficienza della struttura, non solo dal punto di vista energetico ma anche sulla base dell'impatto sull'ambiente e salute dell'uomo. L'edificio allo stato attuale non soddisfa tuttavia i requisiti di un *NetZeroEnergyBuilding* e per tale motivo si provvederà probabilmente a un rinnovamento energetico dello stesso, rivedendo le stratigrafie del modulo originario.

La struttura prefabbricata ha permesso un'efficiente e veloce realizzazione in situ. Essa è stata montata e costruita in una decina di giorni, per opera dell'azienda *NordLegnamiAbitare S.r.l.*, la quale ha collaborato con *be-eco* anche alla stesura del progetto esecutivo. Nella Figura 4.2 si può osservare il montaggio del modulo, iniziato dapprima con l'assemblaggio della struttura prefabbricata, delle travi e pannelli in legno e successivamente con la posa in opera degli isolamenti in sughero.



Figura 4.2: Realizzazione e montaggio del modulo

4.2.1 La tecnologia *NaturWall*

Ciò che rende innovativo l'edificio è l'impiego di un nuovo tipo di tecnologia che prende il nome di *NaturWall*, concetto sviluppato nell'ambito di un progetto promosso dal Dipartimento di Architettura del Politecnico di Torino e brevettato dalla start-up *be-eco*. *NaturWall* si inserisce perfettamente in un contesto dove l'uso di materiali eco compatibili, leggeri e a basso impatto ambientale, di strutture prefabbricate e di facciate efficienti dal punto di vista energetico, assume una rilevanza sempre crescente. Questa tecnologia costituisce un esempio di facciata ventilata prefabbricata, caratterizzata dall'accoppiamento di materiali naturali come legno e sughero. La struttura si compone come segue:

- Pannello opaco di *OSB (Oriented Strand Board)*
- Intercapedine d'aria
- Struttura isolante a "*sandwich*" composta da sughero tostato

Le principali novità di questo componente sono la capacità di comportarsi come un accumulatore di energia, con una notevole riduzione del flusso termico che attraversa la struttura e conseguente miglioramento dell'isolamento termico. Questo determina una riduzione dei consumi energetici di circa il 70% e anche un maggior isolamento acustico [22]. Durante l'inverno, la facciata ventilata presenta un comportamento simile a quello di un collettore solare. I raggi solari penetrano attraverso la struttura e l'intercapedine d'aria trattiene il calore, consentendo di catturare e sfruttare al meglio gli apporti solari, intercettando la radiazione solare, incidente sulla facciata, in Figura 4.3a.

In condizioni estive lo strato isolante in sughero funge da schermo per le radiazioni, impedendo un surriscaldamento delle pareti interne. L'intercapedine d'aria consente, attraverso una ventilazione naturale, di rimuovere il calore in eccesso, in Figura 4.3b.

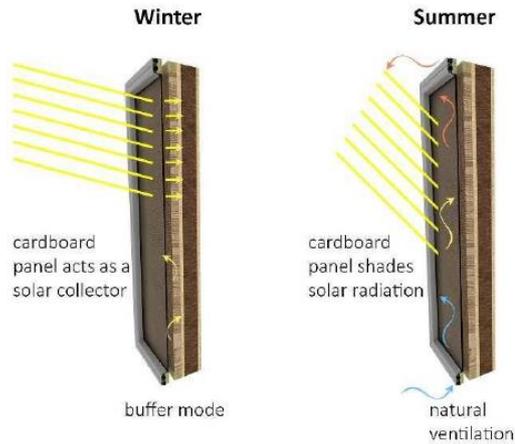


Figura 4.3: a. Funzionamento invernale b. funzionamento estivo

In una campagna di test sperimentali, condotta in collaborazione con il Dipartimento di Architettura del Politecnico di Torino e dalla start-up be-eco, si è potuto osservare come questa configurazione sia la più efficiente rispetto ad altri modelli di facciate ventilate. Durante le ore notturne, infatti, la temperatura dell'ambiente interno era maggiore per la facciata ventilata in esame piuttosto che per le altre. Questo è giustificato dalla presenza del pannello in sughero, il quale è dotato di un ottimo isolamento. D'altra parte, la cavità d'aria presenta una temperatura minore grazie a una più efficiente ventilazione naturale e grazie a una maggiore resistenza termica della struttura, che si oppone al passaggio del calore [23], [24].

4.2.2 Stratigrafia

La struttura si compone come segue:

- Tetto: costituisce un innovativo tipo di copertura, chiamata *cool roof*. Lo strato esterno è stato realizzato con una guaina impermeabile ad alta riflettanza ed emissività termica. In questo modo, la radiazione solare incidente sul materiale viene riflessa in maniera efficace e si osserva un aumento dello scambio termico con l'ambiente esterno, che consente di dissipare il calore accumulato durante le ore diurne. Come conseguenza, le temperature raggiunte dal tetto sono più basse (attorno ai 30°), permettendo una riduzione del fabbisogno termico estivo e l'abbassamento della temperatura interna degli ambienti, evitando il fenomeno della cosiddetta *isola di calore* [25]. Questo evento si manifesta in prossimità di agglomerati urbani, laddove la presenza di materiali come asfalto e cemento, l'inquinamento, il traffico automobilistico, la concentrazione di attività industriali e i sistemi di climatizzazione contribuiscono ad innalzare notevolmente le temperature. Le membrane bituminose, della tipologia *Bituver Megaver California*, sono state fornite dall'azienda Saint-Gobain Isover.

Uno strato di OSB (*Oriented Strand Board*) in legno di pioppo, dello spessore di 25

mm, precede un intercapedine d'aria, la quale favorisce il meccanismo della ventilazione naturale. Questo tipo di tecnologia, consente dunque la creazione di movimenti d'aria ascensionali, permettendo lo smaltimento del calore in eccesso e del vapore acqueo sia in inverno che in estate.

Uno strato di sughero di tipo Corkpan, dello spessore di 100 mm, viene impiegato come penultimo strato, seguito poi da un ulteriore pannello di OSB. Questa tipologia di sughero consente un buon isolamento della copertura, oltre ad essere un materiale eco compatibile, naturale e riciclabile al 100%. Il sughero appare di colore scuro, poiché tostato per migliorarne le proprietà di coibentazione e le prestazioni⁸. Per una maggiore chiarezza, in Figura 4.4 è mostrata la stratigrafia completa:

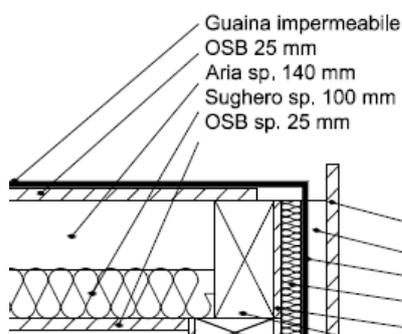


Figura 4.4: Stratigrafia copertura

- Solaio: uno strato di sughero Corkpan dello spessore di 100 mm, costituisce il rivestimento esterno della struttura, conferendogli un buon grado di isolamento, come esposto sopra. Un'intercapedine d'aria di 60 mm consente, attraverso la ventilazione, la rimozione del calore e umidità in eccesso. Un penultimo strato di guaina impermeabile rafforza la coibentazione della struttura per finire con un ultimo strato di OSB di legno di pioppo, con spessore di 25 mm, Figura 4.5.

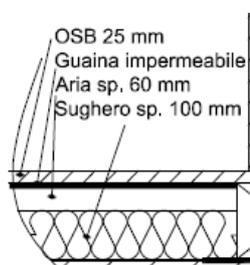


Figura 4.5: Stratigrafia Solaio

⁸ <https://www.tecnosugheri.it/prodotto/corkpan/>

- Parete con esposizione Sud-Est: uno strato di sughero MD, dello spessore di 50 mm è posto faccia a vista. Si tratta di una versione a maggiore densità del modello Corkpan, utilizzato per l'isolamento a cappotto dell'edificio. Segue un pannello XLAM dello spessore di 80 mm e un pannello di OSB dello spessore di 15 mm.
- Pareti con esposizione Nord-Est e Sud-Ovest: struttura a facciata ventilata con pannello di pioppo OSB nello strato interno, un'intercapedine d'aria di 100 mm e una pannello sandwich formato due strati esterni di sughero e un core in OSB. L'isolamento è formato da uno strato di sughero, uno strato di guaina impermeabile e un ultimo strato di OSB. La stratigrafia è rappresentata in Figura 4.6.

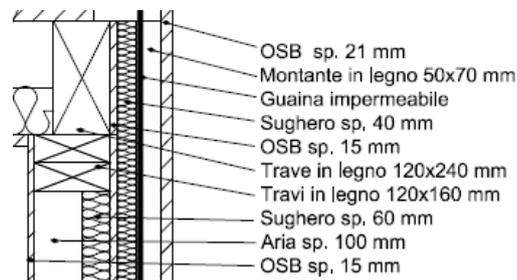


Figura 4.6: Stratigrafia pareti esposte a Nord-Est e Sud-Ovest

- Parete con esposizione Nord Ovest: stratigrafia visibile in Figura 4.7 di seguito.

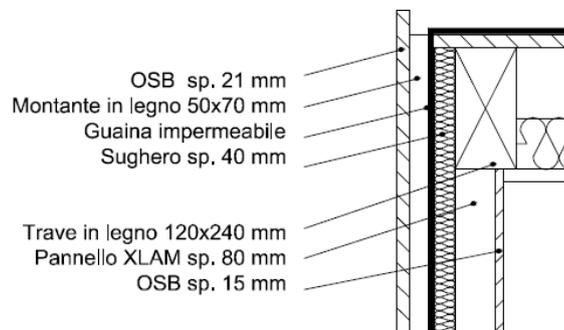


Figura 4.7: Stratigrafia parete esposta a Nord-Ovest

Inoltre, lungo le facciate dell'edificio sono stati posizionati dei teli traspiranti della tipologia *Isover Vario*, che aiutano le facciate ventilate a controllare l'umidità dell'ambiente interno. Essi si comportano come una "pelle sensibile", evitando l'insorgere di muffa e condensa. Grazie alla loro matrice traspirante infatti, permettono sia di asportare l'umidità in eccesso sia di fungere da isolamento termico tramite un sistema di tenuta d'aria.

4.2.3 Suddivisione in due ambienti e orientamento del modulo

Si è pensato in seguito, di adibire l'edificio a una sala studio e una sala riunioni per il Politecnico di Torino, suddividendolo dunque in due ambienti. Inizialmente, per la Sala Riunioni si è pensato a un'esposizione Sud-est mentre per la Sala studio un'esposizione Nord-ovest. Qui di seguito è mostrato il possibile orientamento del modulo (Figura 4.8).

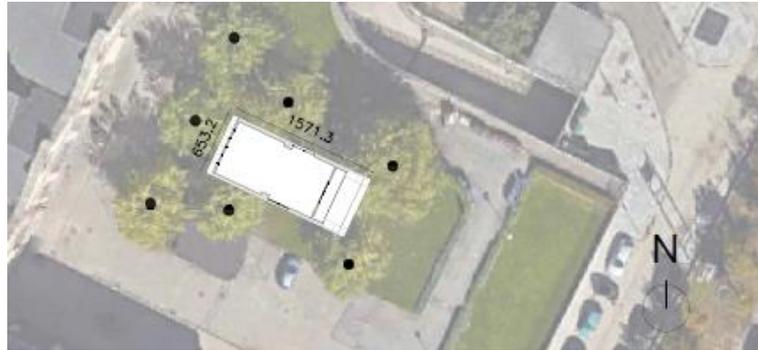


Figura 4.8: Possibile orientamento del modulo

Come si vedrà in seguito, si è pensato di orientare il modulo diversamente rispetto all'idea originaria, disponendolo in modo che ciascun lato sia orientato secondo i punti cardinali. La suddivisione in due ambienti, anche se non ancora effettivamente realizzata, è mostrata in Figura 4.9.

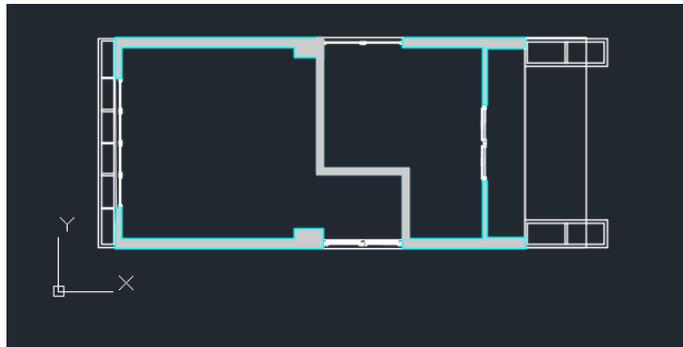


Figura 4.9: Suddivisione del modulo in due ambienti

Con questa suddivisione la sala riunioni ha una superficie di $23,55 \text{ m}^2$ mentre la sala studio presenta una superficie di circa 43 m^2 , con parete divisoria dello spessore di circa 21 cm. Inoltre è stata prevista l'installazione di un impianto fotovoltaico per soddisfare la richiesta di energia di ogni ambiente. In condizioni di surplus di energia elettrica prodotta, il sistema di batterie andrà a immagazzinarla per poter essere usata quando non c'è alcuna disponibilità.

Capitolo 5

5 Obiettivi e metodologia

Scopo dell'analisi è la valutazione del fabbisogno termico per riscaldamento e raffrescamento del modulo abitativo, in diverse configurazioni di funzionamento, e il conseguente dimensionamento della pompa di calore, operante sia in regime invernale che estivo. Il calcolo è stato condotto tramite l'uso di *EnergyPlus*, un software di analisi energetica e simulazione dei carichi che modella i consumi energetici - ad esempio inerenti al riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e illuminazione. L'edificio è stato rappresentato prima sul software *SketchUp*, che ha permesso di effettuare una modellazione 3D e una prima definizione delle caratteristiche del modulo, quali, ad esempio, il suo orientamento e la separazione in due ambienti.

Ottenuti i fabbisogni termici per riscaldamento e raffrescamento, si sono dunque calcolati i consumi elettrici relativi alla climatizzazione dell'edificio. A questi si sono sommati poi i consumi elettrici dovuti agli altri apparecchi: sistema di illuminazione, postazioni elettriche, ecc.

Stimata la radiazione solare tramite il software *EnergyPlus* - incidente sulle superfici dei moduli fotovoltaici rappresentati su *SketchUp* - è stata poi determinata la produzione elettrica e analizzato l'accoppiamento tra carichi elettrici e produzione e calcolati l'autoconsumo e autosufficienza per ciascun ambiente.

5.1 Il software *SketchUp*



SketchUp è un importante software per la modellazione 3D, largamente impiegato nel campo dell'Architettura, del Design, dell'Urbanistica e dell'Ingegneria. Consente una semplice ma realistica rappresentazione di edifici e oggetti di qualsiasi natura e per questa ragione viene utilizzato anche da svariati grafici per lo sviluppo di videogiochi o film di animazione. Il software venne realizzato nel 1999 dalla start-up *@Last Software*, fondata da Brad Schell, ingegnere civile, e Joe Esch, informatico. Il programma venne successivamente commercializzato nel 2000. In seguito la start-up venne acquistata da *Google* nel 2006 e successivamente nel 2012 passò nelle mani di *Trimble Navigation*. Il programma si distingueva dagli altri software presenti sul mercato per la sua capacità di

rappresentare fedelmente qualsiasi oggetto, consentendo una flessibilità mai osservata fino ad allora [26].

Il software è reso disponibile in differenti versioni, sia a pagamento sia gratuite. Per la modellazione dell'edificio è stata utilizzata la versione gratuita *SketchUp Make 2017* che consente di effettuare una prova gratuita di 30 giorni della versione a pagamento *SketchUp Pro*. Il programma è compatibile con applicazioni come *Google Earth*, grazie a cui è possibile importare direttamente una topografia per creare successivamente delle rappresentazioni 3D, avendo chiara la morfologia del luogo.

Un aspetto innovativo di *SketchUp* è la capacità di simulare l'effetto della luce e delle ombre, in qualsiasi ora del giorno e mese dell'anno. Inoltre, *SketchUp* dispone di una libreria, denominata *3D Warehouse*. Da essa è possibile scaricare gratuitamente diversi oggetti 3D che vanno dagli elementi per l'arredo di un edificio a differenti modelli di moduli fotovoltaici di varie compagnie produttrici. I modelli sono creati da diversi utenti e vengono condivisi per essere direttamente scaricati e utilizzati.

SketchUp si presenta con un'interfaccia grafica molto semplice e intuitiva, ricca di tanti strumenti per effettuare una modellazione accurata e rapida. Al programma possono essere aggiunti, a seconda del tipo di lavoro svolto, diversi *plug-in* e applicazioni che ampliano gli strumenti messi a disposizione dal software. Nel caso in esame è stato utilizzato *Open Studio Sketch-Up Plug-in* versione 2.3.0.

Open Studio è un software free e open-source, rilasciato nell'aprile 2008 dal *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. Si presenta come una piattaforma in cui sono disponibili diversi *tool* che aiutano l'utente a realizzare una modellazione finalizzata poi a effettuare studi di natura energetica, ancora prima della realizzazione di un edificio.

Il *plug-in* usato è stato utile in una prima definizione delle grandezze, inserite poi come input nel programma di simulazione energetica. L'utilizzo di *SketchUp* è stato dunque finalizzato alla sola rappresentazione 3D dell'edificio, preferendo successivamente *EnergyPlus* per una definizione più accurata delle caratteristiche termiche ed energetiche dell'edificio.

5.2 Il software *EnergyPlus*



EnergyPlus è un software di modellazione energetica in regime dinamico degli edifici, utilizzato principalmente da Architetti ed Ingegneri per stimare i consumi energetici per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e uso di acqua calda sanitaria in un edificio. Precedentemente incentrato sull'analisi energetica di edifici ad uso commerciale, venne successivamente esteso anche a edifici residenziali. Basandosi sull'analisi termofisica e le varie equazioni di bilancio energetiche, il software permette di calcolare i carichi termici per riscaldamento e raffrescamento necessari per mantenere in ambiente i set-point desiderati.

EnergyPlus è un'evoluzione di due precedenti programmi, sviluppati negli anni '70 –'80: *BLAST* (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e *DOE-2* (*Department of Energy*). Il software venne elaborato dal Department of Energy (DOE) e dal CERL (US Army Construction Engineering Research Laboratories), in collaborazione con Centri di Ricerca e Università Americane.

I software padri di *EnergyPlus* nacquero in un contesto in cui ci si scontrò per la prima volta con problemi riguardanti il risparmio energetico, in seguito alla Crisi Energetica che vide un aumento dei prezzi del petrolio, nel 1973. Ci fu dunque una presa di coscienza sull'importanza dell'efficienza energetica, in particolare negli edifici, consapevoli che la maggior parte dei consumi energetici proveniva da questo settore.

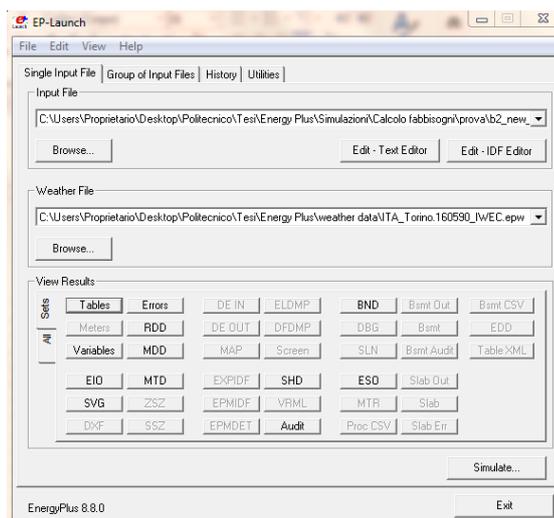
I due software utilizzavano una vecchia versione del linguaggio di programmazione *FORTRAN*. La struttura, articolata e complessa, determinava grandi difficoltà nell'adeguare e aggiornare continuamente i codici: i due software non erano infatti in grado di stare al passo con i tempi e con il progresso tecnologico, che stava portando in quegli anni al crescente sviluppo dei sistemi HVAC.

EnergyPlus nacque nel 2001 e fu inizialmente scritto in linguaggio FORTRAN90 (convertito successivamente in C++ nel 2012). Una delle maggiori novità era la capacità del software di gestire in maniera efficiente la moltitudine di fattori che influenzava le simulazioni energetiche degli edifici. L'ultima versione di *Energyplus* comprende l'analisi non solamente delle variabili termiche dell'edificio, ma anche delle caratteristiche inerenti le apparecchiature elettriche, i sistemi di illuminazione, ecc. Nel programma sono implementati dei modelli fisici per aria, umidità e trasmissione del calore. Si può calcolare l'illuminazione, l'ombreggiamento e consente una completa modellazione del sistema HVAC, dei sistemi di refrigerazione e tanto altro.

Il software è inoltre gratuito e *open source* in quanto la missione dei suoi sviluppatori è quella di dare a tutti la possibilità di contribuire a un miglioramento e affinamento del programma. In questo modo lo si potrà rendere un riferimento per la simulazione energetica degli edifici, volta a trovare soluzioni per il risparmio energetico.

La versione del software che è stata utilizzata in questo lavoro è la 8.8.0.

EnergyPlus non possiede un'interfaccia grafica ma le simulazioni e l'inserimento dei dati avvengono tramite l'*EP-Launch Program*, l'interfaccia di *EnergyPlus* (Figura 5.1).

Figura 5.1: Interfaccia *EnergyPlus*, *EP Launch Program*

L'*EP Launch Program* riceve in input sia un file formato IDF (*Input Data File*) di tipo ASCII, contenente tutti i dati che descrivono in dettaglio le caratteristiche dell'edificio, sia un file EPW, sempre di tipo ASCII, contenente i dati climatici riferiti alla località in cui l'edificio è situato.

L'inserimento dei dati che descrivono l'edificio viene effettuato tramite il comando *IDF Editor* che permette di visualizzare, modificare o aggiungere i dati contenuti nel file IDF. All'interno del file IDF è presente una lista di classi in cui è possibile definire tutte le caratteristiche dell'edificio, quali le sue coordinate spaziali, i materiali di cui è fatto, le apparecchiature elettriche e le luci, il numero di occupanti, i vari dettagli sui diversi impianti come il sistema HVAC, ecc. La sola definizione delle caratteristiche dell'edificio nelle classi dell'*EP-Launch* risulta abbastanza artificiosa, soprattutto per quanto riguarda l'inserimento delle coordinate spaziali di tutte le sue superfici. La schermata utilizzata per la definizione delle classi è mostrata in Figura 5.2.

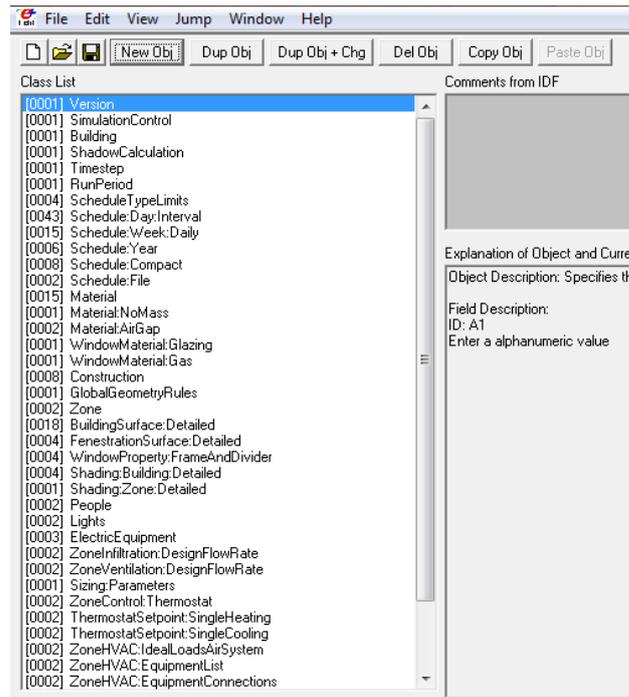


Figura 5.2: Definizione in classi

Per questo motivo, con l'aiuto di software che posseggono interfacce grafiche, come *SketchUp* con il plug-in di *OpenStudio*, è possibile creare un iniziale modello termico dell'edificio ed esportarlo in formato IDF per essere acquisito su *Energyplus*. Questo aiuta l'utente in una prima definizione delle caratteristiche dell'edificio, quali coordinate, superfici e condizioni al contorno.

Una volta definite le caratteristiche essenziali, si può poi procedere sull'interfaccia di *EP-Launch*.

La simulazione, avviata attraverso il comando *Simulate*, è caratterizzata dalla presenza di una finestra DOS che mostra gli sviluppi della simulazione. Terminata l'esecuzione, viene mostrata successivamente una finestra che segnala il numero di eventuali *Errors* e *Warnings* rilevati e il tempo in cui la simulazione si è svolta.

EP Launch non permette soltanto di caricare i file IDF per avviare la simulazione ma, una volta terminata, consente di visualizzare i diversi file generati. Tra questi ci sono i vari file di testo che comprendono, ad esempio, la lista degli eventuali errori o avvisi da parte del programma, i file che permettono di visualizzare in formato DWG la struttura dell'edificio, un file formato CSV che contiene tutte le variabili impostate come output della simulazione, vari report che sintetizzano le variabili inserite come input e le condizioni al contorno, una sintesi annuale sulle prestazioni dell'edificio, ecc.

5.3 Modellazione del caso studio

5.3.1 Edificio

Grazie al plug-in *Open Studio*, che ha permesso un'estensione delle funzionalità di *SketchUp*, sono stati sfruttati diversi strumenti per la modellazione 3D del modulo (Figura 5.3).

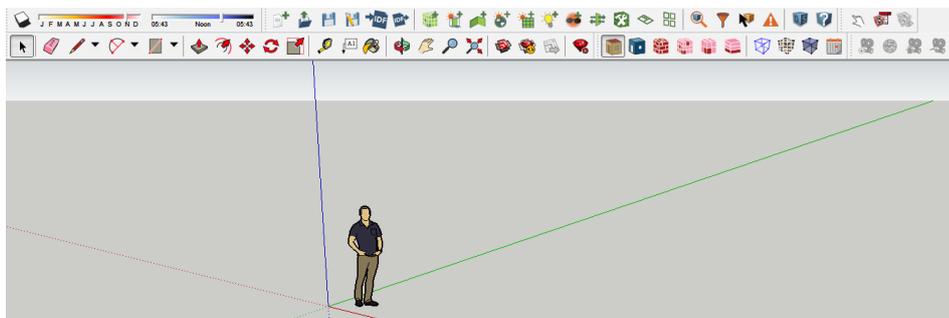


Figura 5.3: Interfaccia grafica *SketchUp*

Per il calcolo dei fabbisogni energetici dell'edificio, secondo quanto stabilito dalla normativa UNI TS 11300-1, è necessario suddividere l'edificio in zone termiche. Una zona termica è un ambiente avente una temperatura uniforme, gestita da un medesimo impianto e impiegato per la stessa destinazione d'uso. Dunque, essendo gli ambienti in cui è suddiviso l'edificio adibiti a scopi differenti e gestiti separatamente, sono stati considerati come due zone termiche separate. Attraverso il comando *New Space* è stato possibile creare uno spazio all'interno del quale definire così le due zone termiche. Quindi, alla Sala Riunioni è stata associata la Zona Termica 1, mentre alla Sala Studio la Zona Termica 2. Grazie a questa separazione, il programma *EnergyPlus* ha potuto ricevere come input tutte le caratteristiche definite su *SketchUp*, associando ciascuna alle due zone termiche e tenendo conto di questa distinzione.

Per la rappresentazione dell'edificio sono state utilizzate le misure ricavate dalle planimetrie in possesso. L'edificio presenta delle dimensioni totali di 11,13x5,97x3 metri.

Lo strumento *Interior Partition Group* ha consentito la rappresentazione della parete divisoria tra i due ambienti, dello spessore di 20,5 cm. Questo comando produce uno spazio in cui il software riconosce le superfici come pareti interne dell'edificio. Creare un *Interior Partition Group* è consentito solo all'interno di una zona termica e dunque è stato effettuato all'interno della Zona Termica 2 (Sala Studio).

Successivamente è stato realizzato un accoppiamento tra le superfici adiacenti appartenenti alle due zone termiche, attraverso il comando *Surface matching*. In questo modo sono state impostate le condizioni al contorno delle superfici, associando a ciascuna delle "Outside boundary condition" di tipo *Surface*.

L'orientamento dell'edificio è stato eseguito agevolmente avendo come riferimento gli assi coordinati presenti mostrati in Figura 5.3. L'asse rosso a linea continua indica l'Est, a linea tratteggiata indica l'Ovest. L'asse verde a linea continua indica il Nord mentre quello a linea tratteggiata indica il Sud. L'edificio è stato inizialmente disposto con Sala Riunioni orientata verso Sud-est e Sala Studio orientata verso Sud-ovest, coerentemente con le ipotesi iniziali. In seguito si è pensato a un orientamento differente, disponendo l'edificio secondo i punti cardinali e ruotandolo di 45° in senso antiorario rispetto alla configurazione originaria.

Per una corretta disposizione del modulo si è fatto riferimento alla vista satellitare del luogo, visibile su *Google Maps* (Figura 5.4).

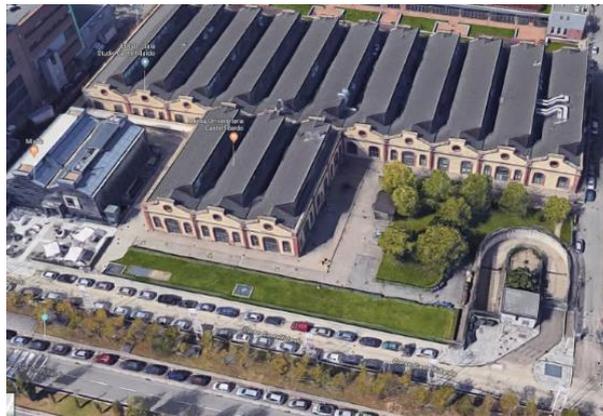


Figura 5.4: Vista satellitare del luogo

5.3.2 Superfici schermanti

Il comando *New Shading Surface Group* ha invece permesso di tenere conto di eventuali superfici schermanti presenti, come visibile dalla rappresentazione 3D su *SketchUp* in Figura 5.5. Gli oggetti che influiscono sull'edificio sono la Mensa Universitaria Edisu, gli alberi circostanti, l'aggetto schermante posto all'ingresso del modulo e i moduli fotovoltaici di futura installazione.

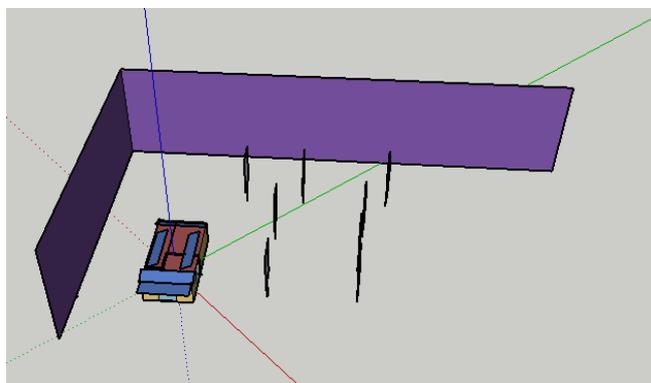


Figura 5.5: Rappresentazione 3D su *SketchUp*

Un gruppo di superfici schermanti può costituire esso stesso una zona, come le pareti della mensa o gli alberi, oppure può essere rappresentato all'interno di una zona termica. In questo studio l'oggetto è stato rappresentato come superficie schermante all'interno della Zona termica 1 e i moduli fotovoltaici sono stati rappresentati secondo la logica esposta nel Paragrafo 5.3.3.

L'effetto dell'ombreggiamento, indotto dalla presenza di questi corpi, va ad influenzare gli apporti solari sul modulo abitativo, nonché i carichi termici per riscaldamento e raffrescamento. Grazie a tale definizione, *Energyplus* ha inserito automaticamente le superfici schermanti all'interno delle classi *Shading:Building:Detailed* (per alberi e pareti della mensa) e *Shading:Zone:Detailed* (per superficie aggettante e moduli fotovoltaici).

Le dimensioni delle superfici della Mensa Universitaria sono state ottenute, su richiesta, dall'area edilizia e logistica *Edilog* del Politecnico di Torino, che offre un servizio di gestione del patrimonio immobiliare. Le misure sono state ricavate effettuando delle sezioni sulla struttura, visibile in Figura 5.6, e riportandole nel file con formato DWG.

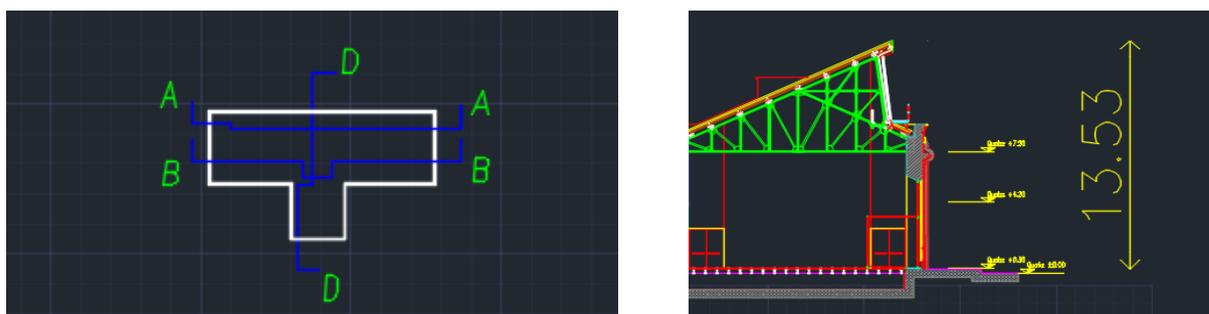


Figura 5.6: Sezione della struttura e altezza degli edifici

La porzione di superficie della mensa con esposizione Nord-Est ha una lunghezza di circa 37 m mentre la superficie con esposizione Sud-Est ha una lunghezza di circa 60 m. L'altezza degli edifici è invece pari a circa 13,50 m (Figura 5.6), comprensiva anche del tetto.

Per quanto riguarda la misura degli alberi, tramite misurazioni effettuate personalmente sul posto per mezzo dell'applicazione per Smartphone "*Smart Measure*", che fornisce l'altezza e le mutue distanze tra gli oggetti, si sono riuscite a ricavare tutte le dimensioni necessarie per una definizione preliminare dei corpi schermanti. L'altezza degli alberi è stata stimata essere pari a circa 8 m, con una larghezza delle fronde di circa 3,50 m. Il tronco possiede invece un diametro di circa 35 cm.

Lo *Shadow Settings* è invece uno strumento molto utile che consente di visualizzare le ombre create dalle superfici schermanti ed esaminare come esse influenzano il modello. Attraverso questo comando si possono simulare le condizioni di illuminazione solare in

un determinato momento dell'anno, scegliendo l'ora e il mese. Ad esempio, impostando la data 13 Aprile con orario 14:30 (Figura 5.7) la situazione sarà dunque la seguente:

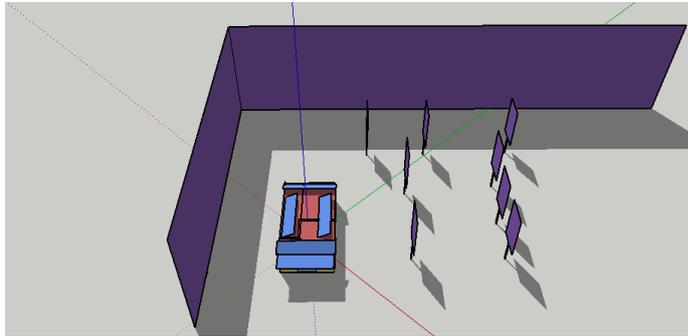


Figura 5.7: Situazione del 13/04 ore 14:30 con la funzione *Shadow Settings*

Un altro strumento utilizzato è stato l'*Open Studio Inspector*, una funzionalità del plugin Open Studio che permette di visualizzare le differenti informazioni sulle varie superfici del modello, ovvero: la tipologia di superficie, il nome assegnatoli, il nome dello spazio in cui essa è stata definita, le condizioni al contorno e le coordinate spaziali.

5.3.3 Moduli fotovoltaici

Successivamente si è tenuto conto della presenza dei moduli fotovoltaici. Questo risultava utile sia per il calcolo della radiazione incidente tramite il software *EnergyPlus*, sia per tenere conto del loro effetto oscurante sulla copertura del modulo abitativo. Schermando una parte della radiazione solare incidente sulla copertura, vanno infatti a diminuire la quantità di apporti solari gratuiti, influenzando sul calcolo dei carichi termici e dunque elettrici. Per rendere più veritiera possibile la simulazione, dal sito *3D Warehouse*, la libreria di *SketchUp*, è stato possibile ispirarsi a differenti tipologie di moduli fotovoltaici. I moduli fotovoltaici disponibili sul sito sono stati creati e caricati da differenti utenti e si ispirano ai vari modelli di diverse aziende produttrici disponibili sul mercato, come *SunPower*, *CanadianSolar*, *Suntech* e *TrinaSolar*. La tipologia alla quale ci si è ispirati è appartenente a una delle compagnie leader nel settore del fotovoltaico: *SunPower*. Il modello del modulo è del tipo X21 con una potenza di 345 W. Le dimensioni sono 1559x1046x46 mm.

La tipologia dei moduli fotovoltaici è stata scelta per avere un reale riferimento riguardo le dimensioni. Per quanto riguarda la potenza di ciascun pannello, invece, si è deciso di ricondursi a un caso più generale possibile e ipotizzare, dunque, per il calcolo della produzione elettrica, una potenza di 300 W, senza rimanere vincolati alla tipologia prescelta.

Sei moduli fotovoltaici sono stati predisposti in serie in modo da formare una stringa. Si è ipotizzato che ciascun ambiente del modulo abitativo fosse alimentato da due stringhe di moduli fotovoltaici, disposte parallelamente ai lati dell'edificio. Bisogna precisare che

la disposizione dei moduli e la loro collocazione su un determinato lato della copertura, non è indice del fatto che alimentino necessariamente la zona sopra cui sono posti. L'obiettivo è stato infatti quello di disporre i moduli in modo che la produzione elettrica fosse il più possibile accoppiata con i carichi elettrici di ciascuna Sala, in relazione al loro funzionamento. Questa scelta è giustificata dalla presenza di un sistema di accumulo di batterie agli ioni di litio. Per mirare infatti a un funzionamento autonomo dell'edificio, si è cercato di allineare produzione e consumi in modo da autoconsumare il più possibile e ricorrere, laddove i consumi superassero la produzione o la produzione superasse i consumi, all'uso della batteria. La presenza della batteria è dunque determinante nella scelta dell'orientamento dei moduli. In sua assenza, infatti, i moduli sarebbero stati probabilmente orientati verso Sud, in modo da massimizzare la produzione giornaliera e sfruttare al meglio la radiazione solare.

La prima configurazione considerata è la seguente:

- Due stringhe, ciascuna con una potenza elettrica nominale di 1,8 kW, sono state poste, una dietro l'altra, secondo un orientamento a Sud-Ovest per coprire i consumi elettrici della Sala Studio. La potenza elettrica nominale totale installata è dunque di 3,6 kW. L'intento è infatti quello di accoppiare il più possibile la curva di carico dei consumi elettrici della Sala studio, utilizzata dalle 9:00 alle 17:00, con il profilo giornaliero della radiazione di un pannello fotovoltaico orientato a Sud-Ovest. L'esposizione Sud-Ovest dei moduli permette quindi di massimizzare l'efficienza di produzione di energia elettrica del giorno, in linea con le ore di utilizzo della sala studio.
- Per quanto riguarda la Sala Riunioni, è stato ipotizzato un funzionamento nelle prime ore del mattino, precisamente dalle 9:00 alle 12:00 e nelle ultime ore del pomeriggio, dalle 14:00 alle 17:00. Per tale funzionamento, due stringhe di moduli, ciascuna della potenza di 1,8 kW, sono disposte rispettivamente lungo i lati Nord-Ovest e Sud-Est del tetto del modulo abitativo, per un totale di 3,6 kW. Ancora una volta, questa scelta è motivata dalla volontà di ottimizzare il rendimento dei moduli nelle ore del mattino e del pomeriggio, coerentemente con il funzionamento dell'ambiente.

In seconda analisi, variando l'orientamento dell'edificio, l'orientamento dei pannelli fotovoltaici è stato variato di conseguenza. Dunque, nella nuova configurazione si avrà:

- Due stringhe orientate a Sud e che producono energia per alimentare la Sala Studio.
- Due stringhe rispettivamente orientate a Est e Ovest che producono energia per alimentare la Sala Riunioni.

Per quanto riguarda la loro inclinazione, si è scelta un iniziale angolo di tilt di 25°, coerentemente con l'inclinazione dei tetti a Torino.

I moduli fotovoltaici sono stati rappresentati sul software all'interno dello spazio definito dal comando *New Shading Surface Group*, che permette di caratterizzare le superfici come schermanti.

In Figura 5.8 è possibile visualizzare la disposizione dei moduli fotovoltaici dell'edificio, secondo il criterio esposto sopra.

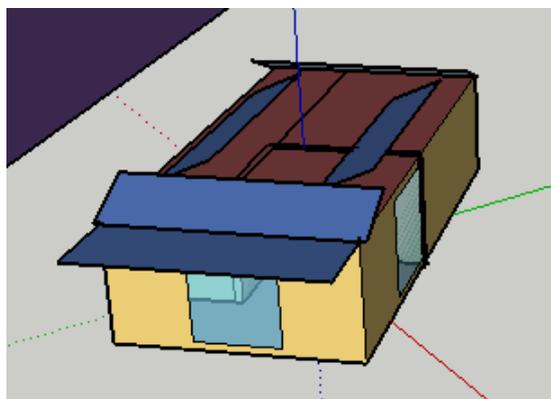


Figura 5.8: Modello definitivo

5.4 Simulazione termo-energetica

Effettuata la rappresentazione del modulo su *SketchUp* si è poi esportato il File in formato IDF, compatibile con *EnergyPlus*, in modo da lavorare direttamente sul software di simulazione energetica.

I dati utilizzati e inseriti nella simulazione fanno riferimento alle caratteristiche del modulo (specialmente nelle stratigrafie) allo stato odierno. In seguito si potrà eseguire la simulazione per il modulo con caratteristiche di NZEB, attraverso una futura definizione delle caratteristiche. Verrà qui di seguito riportata una descrizione del lavoro e dei dati di input inseriti nelle varie classi del programma.

Si è considerato un periodo di simulazione di un anno (dal 1/1 al 31/12), in modo da tenere conto dei consumi sia nella stagione invernale che in quella estiva, basandosi sui dati meteorologici caricati su *EnergyPlus*. La simulazione è stata fatta partire da sabato, in modo che, come anno corrispondente, fosse considerato ipoteticamente il 2005. L'orientamento dell'edificio e dunque le sue coordinate geografiche sono state acquisite da *EnergyPlus*, grazie alla definizione delle stesse nel programma *SketchUp*.

5.4.1 Il File dei dati climatici

Per una corretta valutazione dei consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento dell'edificio, è estremamente importante considerare i dati climatici della località in cui esso è collocato in quanto influenzano enormemente i risultati della simulazione. E' necessario quindi conoscere gli andamenti delle principali grandezze meteorologiche per la località in esame (radiazione diretta e diffusa, temperatura di bulbo secco, umidità relativa, velocità del vento, ecc.).

Per simulare il comportamento medio dell'edificio su lunghi periodi, è indispensabile essere in possesso di una serie annuale di dati, basati su un'analisi storica e che

riproducono abbastanza fedelmente il trend dei principali parametri meteorologici su ampi periodi [27]. A tale scopo è stato introdotto “l’Anno tipo”, denominato anche *Test Reference Year* (TRY) o *Typical Meteorological Year* (TMY), a seconda dei metodi – in particolare di tipo statistico – utilizzati per costruirlo.

L’anno tipo si basa su una serie di 8760 valori reali, elaborati a partire da serie storiche di dati su periodi di tempo di almeno 10 anni. Come prima cosa, infatti, viene valutato l’andamento medio delle grandezze reali (misurate dalle stazioni meteorologiche) per ciascun mese, rappresentativo del periodo di anni preso in considerazione. Le grandezze tipicamente prese in considerazione (importanti soprattutto per la valutazione dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento di un edificio) sono la temperatura di bulbo secco [°C], l’umidità [%], la radiazione [W/m²] e, in misura secondaria, la velocità del vento [m/s]. Il tipico andamento delle grandezze, negli anni considerati, costituisce il riferimento sulla base del quale stabilire, mediante algoritmi statistici quali quello di *Finkelstein-Schafer* (FS), il suo grado di affinità con le grandezze reali di ogni mese di ciascun anno. Viene quindi assegnato, a ciascuna grandezza di ciascun mese, un indice che valuta il suo scostamento rispetto alla media precedentemente calcolata⁹. L’indice di ciascuna grandezza viene poi pesato per andare a costituire un indice generale che indicherà quale mese, di quale particolare anno si avvicinerà di più all’andamento medio delle grandezze del mese. Ad esempio, si confronterà l’andamento delle grandezze del mese di Gennaio di ciascun anno, con l’andamento tipico di tutti i mesi di Gennaio, e trovato il mese dell’anno più affine, lo si sceglierà come mese per la costruzione dell’anno tipo. Una volta trovati i mesi più affini, verranno successivamente uniti per formare l’anno tipo.

L’anno tipo è dunque costruito con mesi reali, riferiti anche a differenti anni, che hanno un comportamento più simile alla media. Essendo i 12 mesi non necessariamente appartenenti allo stesso anno, per evitare delle situazioni in cui vi sia una evidente discontinuità tra i dati, allora vengono eliminati i primi e gli ultimi otto valori di ciascun mese e vengono eseguite delle interpolazioni per ricavare i nuovi valori orari.

Per la simulazione, è stato utilizzato il File contenente i dati climatici riferiti alla località di Torino, reperibile dal sito del software, disponibile in formato EPW (*EnergyPlus Weather Format*). Nel sito del software sono disponibili i dati meteorologici di circa 2100 paesi, fissati dalla *World Meteorological Organization region and Country*. Selezionando paese e città, per Torino erano disponibili due tipologie di dati climatici: Torino-Caselle 160590 IGDG (dati elaborati in Italia in onore di Gianni de Giorgio) e Torino 160590 IWEC (*International Weather for Energy Calculations*). Per la simulazione è stato selezionato il file Torino 160590 IWEC, frutto degli studi condotti da un progetto di ricerca dell’ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*). I dati IWEC sono tipici dati utilizzati per la modellazione energetica degli

⁹ www.itmeteodata.com-Test Reference Year

edifici, disponibili per 227 paesi al di fuori degli USA e del Canada. Il file dei dati climatici si basa sull'Anno tipo che è stato costruito a partire dai dati storici di circa 20 anni, precisamente dal 1982 al 1999. Nella tabella sono riportati i mesi con il rispettivo anno di appartenenza al File dei dati climatici (*Torino 160590 IWECC*).

Tabella 5.1: *Test Reference Year* del file dei dati climatici Torino 169590 IWECC

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

Per accedere al file dei dati climatici (essendo in formato EPW) è stato necessario convertirlo in formato CSV, leggibile tramite l'applicazione *Excel*. La conversione è stata effettuata avvalendosi del *Weather Converter Program*, disponibile all'interno della cartella del software *EnergyPlus*. Nella Figura 5.9 qui di seguito è possibile visualizzare l'interfaccia del programma di conversione:

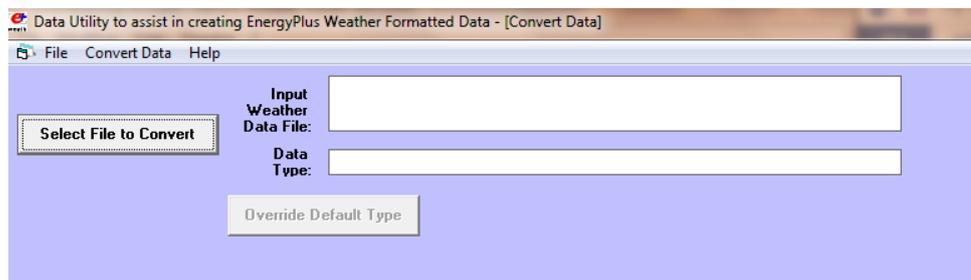


Figura 5.9: *Weather Converter Program*

All'interno del file di dati climatici vengono riportate le caratteristiche della zona geografica considerata:

Tabella 5.2: Parametri principali della località

Località	Torino
Latitudine	45,22°
Longitudine	7,65°
Time Zone	1 h
Altitudine	287 m

Inoltre le grandezze riportate all'interno del file sono: temperatura di bulbo secco e umido [°C], umidità relativa [%], pressione atmosferica [Pa], radiazione totale orizzontale [Wh/m²], radiazione totale orizzontale extraterrestre [Wh/m²], radiazione diretta normale [Wh/m²], radiazione orizzontale diffusa [Wh/m²], direzione del vento [°], velocità del vento [m/s], Total Sky Cover e Opaque Sky Cover (valutate su una scala che va da 1 a 10), precipitazioni [mm], quantità di neve [cm], ecc.

5.4.2 Definizione dei parametri di input

5.4.2.1 Intervalli di tempo

La corretta definizione di questo parametro è necessaria per assicurarsi della validità dei risultati ottenuti attraverso la simulazione. Il valore da inserire indica in quante “porzioni” suddividere il periodo di un’ora. Ad esempio, se questo parametro è impostato su 6, l’ora è divisa in piccoli intervalli di tempo di 10 minuti che rappresentano proprio i *timestep*. Considerare dei piccoli intervalli temporali porta a soluzioni molto più accurate, permettendo di migliorare l’accoppiamento tra i differenti modelli di calcolo, presenti all’interno del programma. Tuttavia, infittire i *timestep*, porta a tempi di simulazione e calcolo più lunghi, anche a seconda della natura del modello che viene assunto. Per una corretta analisi è stato impostato un *timestep* pari a 12, ipotizzando quindi intervalli orari di cinque minuti.

5.4.2.2 Proprietà Zone termiche

In questa sezione vengono acquisite direttamente dal software *SketchUp* le coordinate e la direzione rispetto al Nord geografico delle due zone termiche, ovvero sala studio e sala riunioni. Inizialmente si è scelto un orientamento del modulo abitativo concorde con l’orientamento degli edifici circostanti.



Figura 5.10: Orientamento degli edifici a Torino ed esposizione del modulo verso Sud-est

La Sala Riunioni presenta un'esposizione Sud-Est mentre la Sala Studio un'esposizione Nord-Ovest. Una prima analisi è stata condotta considerando questa esposizione.

In seconda analisi, si è pensato di disporre il modulo in modo che i suoi quattro lati siano orientati lungo le direzioni dei punti cardinali. La regolazione dell'orientamento del modulo è stata realizzata grazie alla classe *Zone* del software *EnergyPlus*. All'interno del campo *Direction of Relative North* è stato inserito un angolo di -45° , ad indicare che il modulo deve essere ruotato rispetto alla configurazione originale, di quella quantità, rispetto al Nord assoluto o geografico. Questo consente di ruotare l'edificio, come si può osservare dalla Figura 5.11 riportata sotto.

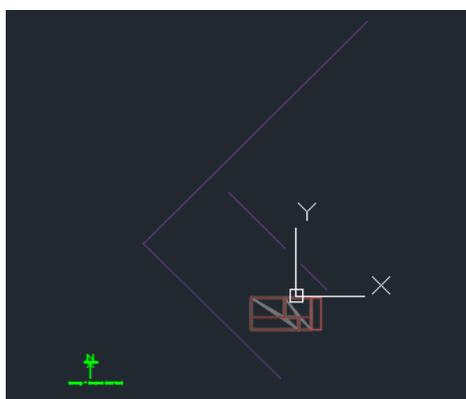


Figura 5.11: Orientamento verso Sud

Oltre al confronto tra esposizione verso Sud-est e Sud, si è voluta effettuare un'analisi riguardo l'effetto dell'incidenza delle ombre e delle superfici schermanti sul modulo. Si è dunque considerata dapprima una configurazione ideale, con assenza di edifici o qualsiasi altro ostacolo intorno all'edificio. In seguito si è considerata una configurazione in cui l'edificio era circondato dalla mensa EDISU e dagli alberi, in quanto di interesse per analizzare in che misura sia la radiazione sia i consumi elettrici, venissero influenzati da questa nuova situazione.

5.4.2.3 Materiali

In questa sezione sono stati considerati i vari materiali di cui è composto l'edificio, incluse le loro proprietà: rugosità, spessore, conduttività, densità e calore specifico. La composizione delle stratigrafie è visibile nel Paragrafo 4.2.2. Qui di seguito, per maggiore chiarezza, sono state raccolte in una tabella le varie caratteristiche:

Tabella 5.3: Caratteristiche dei materiali dell'edificio

Materiali	Conduttività [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	1600	medio liscio
Aria	0,026	1,3	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

Le caratteristiche dei materiali sono state reperite dalle schede tecniche dei prodotti di diverse aziende fornitrici¹⁰.

Per quanto riguarda le finestre, si è fatto riferimento a una struttura a doppi vetri con intercapedine in Argon. Utilizzando la funzione *DataSet*, grazie alla quale si poteva accedere a diverse classi di materiali con caratteristiche di default, nella sezione *WindowGlassMaterial* si è scelto un vetro di tipo CLEAR di spessore di 6 mm.

Dunque la struttura è formata da due strati esterni di vetro CLEAR separati da un'intercapedine di Argon dello spessore di 13 mm.

Per la parete divisoria interna si è ipotizzata una struttura a secco ad alta prestazione termica, leggera e a doppio strato (Figura 5.12). Il sito *naturalia-bau.it*¹⁰ proponeva

¹⁰ Le proprietà della lastra in fibrogesso e del pannello in fibra di legno sono state reperite su *naturalia-bau.it*. Le caratteristiche dei sugheri tostato ed MD invece sono state acquisite grazie ai cataloghi dall'azienda fornitrice *Tecnosugheri Srl*. Le proprietà del pannello XLAM e OSB sono state invece trovate sul sito *www.dataholz.it*, mentre per i restanti si è fatto riferimento al *Foglio di calcolo* del Prof. Vincenzo Corrado del Politecnico di Torino.

numerose soluzioni di strutture per solai, coperture, pareti interne, ecc. E' stata dunque scelta una parete divisoria con la seguente stratigrafia:

- Lastra in gessofibra (spessore di 12,5 mm)
- Pannello flessibile in fibra di legno (spessore 60 mm)
- Lastra in gessofibra (spessore di 12,5 mm)
- Pannello flessibile in fibra di legno (spessore 60 mm)
- Lastra in gessofibra (spessore di 12,5 mm)



Figura 5.12: Parete divisoria interna

Questa scelta è stata effettuata per privilegiare l'isolamento acustico tra i due ambienti, essendo destinati ad attività differenti.

La lastra in gesso fibra possiede un'ottima resistenza a fuoco e dunque costituisce un'ottima scelta come protezione contro gli incendi. Inoltre presenta un buon potere fonoisolante e stabilità meccanica.

Il pannello in fibra di legno è un buon isolante termico e acustico, adatto per essere interposto tra i vari strati di una struttura. La sua struttura è leggera ed ecocompatibile.

5.4.2.4 Definizione delle stratigrafie

I materiali sono stati in seguito raggruppati per andare a formare le stratigrafie nella sezione "Construction" (Figura 5.13). Ogni stratigrafia è stata identificata con un nome, in particolare le pareti dell'edificio sono state identificate con il nome della direzione verso cui si affacciano (per maggiore chiarezza si faccia riferimento al paragrafo Stratigrafia). I materiali che componevano la struttura sono stati inseriti seguendo un ordine che va dallo strato più esterno verso quello interno. Per la parete divisoria sono state create due stratigrafie, ciascuna con i materiali in ordine invertito rispetto all'altra. Questo è stato fatto perché, essendo l'ambiente suddiviso in due zone termiche, la superficie più interna del muro divisorio in riferimento alla Zona termica 1 rappresenta

invece la superficie esterna del muro divisorio in riferimento alla Zona termica 2. Dalla prospettiva di ciascuna zona termica il muro divisorio presenta dunque una stratigrafia speculare rispetto all'altra.

Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
MURO SEPARATORE INVERTITO	MURO SEPARATORE	LATO NORD OVEST	LATO BASAMENTO	COPERTURA	LATO SUD EST	LATO NE-SO	Vetrocamera
Lastra in FibroGesso	Lastra in FibroGesso	OSB21	Sughero100	Guaina Impermeabil	Sughero MD50	OSB21	CLEAR 6MM
Pannello in fibra di legno2	Pannello in fibra di legno	Guaina Impermeabile	Aria60	OSB25	Pannello XLAM	Guaina Impermeabil	ARGON 13MM
Lastra in FibroGesso	Lastra in FibroGesso	Sughero40	Guaina Impermeabile	Aria140	OSB15	Sughero40	CLEAR 6MM
Pannello in fibra di legno	Pannello in fibra di legno2	Pannello XLAM	OSB25	Sughero100		OSB15	
Lastra in FibroGesso	Lastra in FibroGesso	OSB15		OSB25		Sughero60	
						Aria100	
						OSB15	

Figura 5.13: Sezione Construction

Le stratigrafie precedentemente definite nella sezione *Construction*, sono state associate ai corrispettivi componenti del modulo nella classe *BuildingSurface:Detailed*: il solaio, la copertura, il muro divisorio e le pareti verso l'esterno.

La previa rappresentazione su *SketchUp* con plug-in *OpenStudio* ha fatto sì che ogni superficie, acquisita su *EnergyPlus*, fosse già completamente definita in termini di tipologia (“*Floor*”, “*Wall*” e “*Roof*”), coordinate spaziali e condizioni al contorno esterne (“*Outdoors*” se esposte verso l’ambiente esterno e “*Surface*” se facenti parte del muro divisorio interno tra le due zone termiche).

Nella Figura 5.14 sottostante è mostrata la logica di quanto precedentemente esposto.

Field	Units	Obj1	Obj3	Obj5	Obj6
Name		Surface 7	Surface 17	Surface 1	Surface 2
Surface Type		Roof	Roof	Floor	Wall
Construction Name		COPERTURA	COPERTURA	LATO BASAMENTO	LATO NE-SO
Zone Name		ThermalZone 1 Ther	ThermalZone 1 Ther	ThermalZone 1 Ther	ThermalZone 1 Ther
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object					
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	NoSun	SunExposed
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	NoWind	WindExposed
View Factor to Ground					
Number of Vertices					
Vertex 1 X-coordinate	m	2,91681547E+00	1,36471609E+00	2,11071374E+00	5,58614357E+00
Vertex 1 Y-coordinate	m	-4,03404419E+00	-5,58614357E+00	2,11071374E+00	-1,36471609E+00
Vertex 1 Z-coordinate	m	3	3	0	3

Figura 5.14: Sezione Building Surface

Lo stesso lavoro è stato effettuato per le finestre, nella sezione *FenestrationSurface:Detailed*.

Per ciascuna finestra, inoltre, sono state inserite le caratteristiche relative al telaio e al componente divisore della finestra, all'interno della sezione *WindowProperty:FrameAndDivider*.

Per maggiore chiarezza si faccia riferimento alla Figura 5.15.

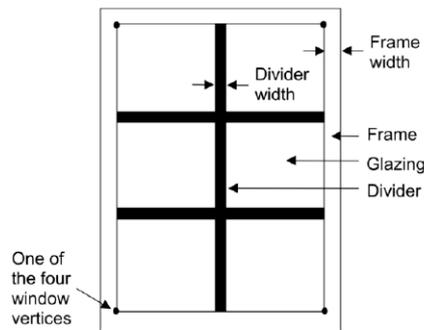


Figura 5.15: Struttura della finestra

5.4.2.5 Le “*Schedule*”

La classe “*Schedule*” è lo strumento chiave che permette di avere il controllo delle diverse grandezze nell’arco del periodo di simulazione. Letteralmente “schedare”, permette infatti di impostare e gestire la variazione dei diversi parametri, quali la frequenza di occupazione delle persone in una zona termica, il grado di illuminazione artificiale di una zona a seconda dell’illuminazione naturale e delle condizioni climatiche esterne, la frequenza di utilizzo di apparecchiature elettriche, le temperature di set-point, il funzionamento del sistema HVAC ecc.

Attraverso la sezione *Schedule:Compact* è possibile controllare i vari parametri in maniera efficiente e in un unico gruppo, inserendo i vari valori che essi assumono. Questo consente di tenere conto di tutti i cambiamenti dipendenti dall’ora del giorno, dal giorno del mese e dal mese dell’anno.

La distribuzione nel corso dell’anno e il valore della frequenza associata a ciascuna grandezza è costruita attraverso i comandi “*Through*”, “*For*” e “*Until*” (Figura 5.16).

Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Persone	PROIETTORE SR	Termostato ESTIVO	Termostato INVERNALE
Fraction	Fraction	Temperature 3	Temperature 3
Through: 1/7	Through: 1/7	Through: 12/31	Through: 1/7
For: AllDays	For: AllDays	For: Weekdays	For: AllDays
Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 6:00	Until: 24:00
0	0	30	15
Through: 7/31	Through: 7/31	Until: 19:00	Through: 12/23
For: Weekdays	For: Weekdays	26	For: Weekdays
Until: 9:00	Until: 9:00	Until 24:00	Until: 6:00
0	0	30	15
Until 17:00	Until 17:00	For: Weekends	Until: 19:00
1	1	Until: 24:00	21
Until: 24:00	Until: 24:00	30	Until: 24:00
0	0		15
For: Weekends	For: Weekends		For: Weekends
Until: 24:00	Until: 24:00		Until: 24:00
0	0		15
Through: 8/31	Through: 8/31		Through: 12/31
For: AllDays	For: AllDays		For: AllDays
Until: 24:00	Until: 24:00		Until: 24:00
0	0		15

Figura 5.16: Logica della "Schedule" per diversi parametri

Il comando *“Through”* è inserito nel campo della *“Schedule:Compact”* per indicare la data (espressa nel formato mese/giorno) in cui la grandezza cessa di assumere i valori specificati. Stabilisce dunque il periodo (che inizia di default dal 1 Gennaio) in cui si registra, per la grandezza in esame, quel particolare andamento dei valori.

Il comando *“For”* invece permette di specificare il giorno o i giorni per cui la grandezza assume un determinato valore. I giorni indicati possono far riferimento ai classici giorni della settimana. Se il *“trend”* dei valori non cambia giornalmente ma si differenzia solamente tra giorni feriali (dal Lunedì al Venerdì) e fine settimana (Sabato e Domenica), allora si può impostare i giorni *“Weekdays”* e *“Weekends”* (come nel caso in esame). Ci sono poi dei giorni particolari come le vacanze (impostate attraverso il comando *“Holiday”*), il giorno di progetto invernale (*“WinterDesignDay”*), il giorno di progetto estivo (*“SummerDeignDay”*), ecc. Il giorno di progetto invernale e il giorno di progetto estivo vengono usati, in particolare modo, per il dimensionamento di un determinato componente (nel caso in esame per il dimensionamento della pompa di calore). Nella classe *SizingPeriod:DesignDay*, vengono impostati il giorno e il mese che si vogliono assumere come giorni di progetto invernali ed estivi e tutte le condizioni di temperatura, umidità, ecc.

Il comando *“Until”*, invece, è utilizzato per specificare fino a che ora la grandezza assume quel determinato valore.

Infine, dopo il comando *“Until”*, viene specificato il valore assunto dalla grandezza.

Nella seconda riga della tabella, mostrata nell'immagine di Figura 5.16, si fa riferimento alla tipologia della grandezza, definita in dettaglio nella classe “*ScheduleTypeLimits*”, in Figura 5.17.

All'interno di questa classe si specifica il range di variazione, impostando il valore massimo e minimo che la grandezza può assumere¹¹. Inoltre è specificato il tipo di valore (discreto o continuo) e l'unità di misura che permette di identificare la tipologia di grandezza, richiamata poi nella classe *Schedule:Compact*. Si può scegliere tra adimensionata, temperatura, differenza di temperatura, angolo, velocità, potenza, ecc.

Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
On/Off	ActivityLevel	Fraction	Temperature 3	HVACTemplate Any
0	0	0		
1		1		
Discrete	Continuous	Continuous	Continuous	
	activitylevel		Temperature	

Figura 5.17: *ScheduleTypeLimits*

Per ricondursi al caso in esame, all'interno della classe *Schedule:Compact* è quindi stata inserita la variazione di:

- Trasmittanza degli alberi, con valore continuo compreso tra 0 e 1.
- Sistema HVAC con valore compreso tra 1 e 4.
- Proiettore e postazioni elettriche della Sala Riunioni e della Sala Studio, espressi in *per unit*. Tali valori vengono poi moltiplicati per la potenza nominale (espressa in W o W/persona) specificata nella classe *ElectricEquipment*.
- Temperatura di set point impostata per il controllo termostatico di ciascuna zona (Sala studio e riunioni) in regime sia invernale che estivo. Il valore impostato è espresso in °C.
- Frequenza di occupazione di ciascuna zona, ovvero numero di persone in *per unit*. Tale valore andrà poi moltiplicato per il numero di persone totali per ciascuna zona, pari a 8.
- Attività svolta, espressa in W/persona, per il calcolo della quota di calore emessa da ciascun occupante.

Quando l'inserimento dei valori all'interno della classe “*Schedule:Compact*” risulta abbastanza macchinoso, in quanto essi subiscono delle variazioni più frequenti, si può ricorrere all'inserimento dei valori in un file (in formato CSV), poi caricato all'interno della classe “*Schedule:File*”. Questo è stato fatto per i valori che indicano la frazione di potenza nominale utilizzata per l'illuminazione dell'ambiente in un dato momento.

¹¹ Per alcune grandezze vengono inseriti i valori espressi nel Sistema Per Unit. Tale sistema esprime i vari parametri come frazione di una determinata grandezza di riferimento (ad esempio nel caso delle Potenze, la grandezza di riferimento è la Potenza Nominale). Il valore minimo ad esse associate è 0 mentre il valore massimo è 1.

I valori variano ora per ora e mese per mese, ed è stato quindi preferibile costruire un Anno tipo, composto da 8760 valori all'interno di un file CSV. La prima riga del file CSV corrisponde alla prima ora del 1 Gennaio, la seconda riga corrisponde invece alla seconda ora del 1 Gennaio e così via. I valori sono espressi in *per unit* perché verranno moltiplicati per la rispettiva potenza nominale dell'impianto di ciascuna zona termica. Disponendo dei valori orari di illuminazione per un giorno tipo per ciascun mese, si è ipotizzato lo stesso andamento per tutti i giorni di ciascun mese e in questo modo, avvalendosi del software *Matlab*, si è costruito l'anno di simulazione. Sono stati dunque creati due file, uno relativo al funzionamento delle luci della Sala studio e l'altro relativo alla Sala riunioni.

5.4.2.6 Carichi interni

Giunti a questo punto, è stato necessario tenere conto degli apporti di calore gratuiti dell'edificio - che influenzano i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento del modulo - e inserirli nelle opportune classi di destinazione.

I contributi di calore all'edificio sono principalmente dovuti a:

- Presenza di persone negli ambienti
- Presenza di apparecchiature elettriche
- Sistema di illuminazione

Tali parametri sono stati definiti in ciascuna delle classi del software: "*People*", "*Lights*" e "*Electric Equipment*".

Nella sezione "*People*" si è preso in considerazione l'effetto della presenza di occupanti in ciascuna zona termica. Tra i parametri più rilevanti da inserire si possono menzionare: il numero di persone, la quantità di calore emessa (comprensiva della quota di calore sensibile e latente), la frazione radiante, e la frazione di calore sensibile.

Innanzitutto, sono stati creati due oggetti in cui inserire i valori associati a ciascun parametro, essendo variabili di ambiente in ambiente. Ciascun oggetto è stato poi associato alla zona termica corrispondente.

Il campo "*Number of people Calculation Method*", ha permesso di scegliere quale tipologia di dato inserire all'interno del campo "*Number of People*". La tipologia di dati si basa sui vari metodi di calcolo disponibili: numero di persone, numero di persone per Area o Area per persone. Scegliendo come dato il numero totale di persone, si è così impostato il numero massimo di occupanti per zona. Successivamente si è associato a ciascun oggetto un'opportuna "*Schedule*" che permettesse di tenere conto del numero effettivo di persone ora per ora. Quest'ultimo è infatti ottenuto moltiplicando il valore in *per unit*, inserito nella *Schedule*, per la quota massima di occupanti per ciascuna zona, inserito nel campo "*Number of People*".

La quota di calore emessa, espressa in W/persona dipende dall'attività svolta dagli occupanti. Essa è stata impostata pari a 120 W/persona, considerando che gli occupanti svolgono una leggera attività, stanno seduti o in piedi e studiano. Il dato è stato impostato

facendo riferimento alla tabella disponibile nella guida *InputOutputReference* di *EnergyPlus* [28], Figura 5.18.

Activity	Activity w/Person gyPlus Value
Seated, quiet	108
Standing, relaxed	126
<i>Walking (on level surface)</i>	
3.2 km/h (0.9 m/s)	207
4.3 km/h (1.2 m/s)	270
6.4 km/h (1.8 m/s)	396
<i>Office Activities</i>	
Reading, seated	99
Writing	108
Typing	117
Filing, seated	126
Filing, standing	144
Walking about	180
Lifting/packing	216

Figura 5.18: Lista di possibili attività svolte dagli occupanti e relativa quota di calore emessa [W/persona].

La frazione radiante, compresa tra 0.0 e 1.0, costituisce un importante parametro per il calcolo della radiazione emessa dagli occupanti, nello spettro delle alte lunghezze d'onda. E' stato scelto come valore quello di default, pari a 0,3.

La quota di calore sensibile è invece stata impostata in modo che venga automaticamente calcolata dal software.

La sezione *Lights*, possiede la stessa logica della classe precedente e permette di inserire le informazioni riguardanti il sistema di illuminazione relativo a ciascun ambiente. Sono stati creati due oggetti, ognuno relativo a una zona termica, ed è stata inserita la potenza nominale dell'impianto di illuminazione, impostando come metodo di calcolo il "*Lighting Level*", espresso in W. Tutti i dati relativi al sistema di illuminazione e alla variazione della potenza elettrica associata alle lampade sono stati ottenuti grazie ad alcuni calcoli, condotti da un altro lavoro di Tesi sul software *DIALux*. Il software permette di stimare l'illuminamento delle superfici e simulare le condizioni di illuminazione degli ambienti interni ed esterni sia sotto l'effetto della luce naturale sia sotto l'effetto della luce artificiale [29]. Il sistema di illuminazione così dimensionato possiede una potenza nominale di 300 W per la Sala Studio e 210 W per la Sala Riunioni. I corpi luminosi, della tipologia "Canda LED" di produzione dell'azienda *3F Filippi*, hanno una potenza di 30 W ciascuna per la Sala studio e 21 W ciascuna per la Sala Riunioni.

Si è tenuto conto della variazione della quota di illuminazione nell'arco di un anno di simulazione, attraverso il File CSV caricato nella Sezione Schedule:File. I valori, espressi in *per unit*, vengono così moltiplicati per la potenza nominale di ciascun impianto di illuminazione, ottenendo così l'effettiva quota di potenza utilizzata per l'illuminazione ora per ora.

La classe *Electric Equipment*, tiene invece conto della presenza di qualsiasi apparecchio che consuma elettricità, come computer, televisori, ecc.

Anche in questo caso sono stati creati due oggetti che tengono conto del funzionamento di ciascun ambiente.

Per entrambe le zone termiche, sono state ipotizzate un massimo di otto postazioni per PC, ciascuna con una potenza nominale di 100 W e fattore di utilizzazione pari a 0,8. L'utilizzo delle postazioni elettriche è strettamente collegato al numero delle persone e dunque il metodo di calcolo è stato impostato su "*Watt/Person*", specificando nell'apposito campo 80 W/persona per ciascuna zona termica. Questo dato è poi stato associato alla "*Schedule*" degli occupanti, in modo che il consumo elettrico dipendesse dalla presenza o meno delle persone.

Per la Sala Riunioni, in aggiunta alle postazioni elettriche, vi è la presenza di un proiettore della potenza nominale di 150 W e con fattore di utilizzazione di 0,5. Non essendo dipendente dal numero di persone, è stato scelto un metodo di calcolo basato su "*EquipmentLevel*", indicando una potenza di 75 W. Infine, la "*Schedule*" ad esso associata fa riferimento all'utilizzo stesso del proiettore, con valori espressi in *per unit*.

5.4.2.7 Calcolo delle ombre

Per tenere conto dell'effetto schermante sul modulo, creato dalla mensa EDISU e dagli alberi il programma esegue un calcolo delle ombre. Questo permette di tenere conto dell'effettiva quota di radiazione solare incidente sul modulo abitativo e sui moduli fotovoltaici, in base non solo alla presenza degli ostacoli circostanti ma anche sulla base della posizione del sole. Il calcolo delle ombre infatti, consente di valutare gli apporti di calore solari dell'edificio, che influenzano significativamente i carichi termici invernali ed estivi. I calcoli vengono eseguiti su un dato periodo, impostato attraverso il parametro *Calculation Frequency*, assunto di 20 giorni. Per tale periodo viene dunque eseguito un calcolo che permette di ricavare dei dati medi sulla posizione, sugli angoli solari, ecc., assumendoli costanti all'interno del lasso temporale di 20 giorni. Il metodo di calcolo si basa sull' *AverageOverDaysInFrequency*, che fornisce uno strumento di calcolo rapido e preciso. Per il modello *SkyDiffuse*, è stato considerato un metodo di calcolo basato sul *DetailedSkyDiffuseModeling*, molto più preciso, in quanto tiene conto che superfici schermanti quali gli alberi circostanti, variano la loro trasmittanza a seconda delle stagioni e non vengono considerate come superfici opache [28].

All'interno della categoria *Shading:Building:Detailed*, sono stati inseriti gli elementi schermanti esterni all'edificio che influenzano la radiazione solare incidente sul modulo, introducendo un effetto d'ombra. Precedentemente rappresentati su *SketchUp*, essi sono la mensa universitaria EDISU e gli alberi circostanti. Ad ogni superficie schermante è stato associato un determinato valore di trasmittanza, compreso tra 0.0 e 1.0. Questa grandezza è definita come il rapporto tra la radiazione trasmessa dalla superficie e la radiazione totale incidente su tale superficie. L'edificio della mensa universitaria EDISU è opaco e dunque gli è stato associato un valore di trasmittanza pari a zero.

Gli alberi invece, sono stati considerati con una trasmittanza variabile, a seconda delle stagioni. La variazione del valore di trasmittanza è stata considerata all'interno della "Schedule:Compact" e associata alle superfici corrispondenti. Dal 1 Gennaio al 1 Marzo la trasmittanza associata è di 0,8, tenendo conto del fatto che gli alberi sono spogli. Dal 1 Marzo al 31 Marzo è stata invece considerata una trasmittanza di 0,5, per considerare il periodo in cui iniziano a crescere le foglie. Dal 31 Marzo al 30 Settembre è stata fissata una trasmittanza di 0,15, per alberi con foglie, mentre dal 30 Settembre al 31 Ottobre una trasmittanza di 0,5 per tenere conto del periodo in cui le foglie iniziano a cadere. Infine dal 31 Ottobre al 31 Dicembre la trasmittanza termica sale nuovamente fino a 0,8, arco temporale in cui gli alberi tornano ad essere spogli.

Nella sezione *Shading:Zone:Detailed*, invece, si è tenuto conto dell'effetto schermante della superficie aggettante (appartenente alla Sala Riunioni, Zona Termica 1) e dei moduli fotovoltaici (una stringa di moduli appartenente alla Zona termica 1 e 3 stringhe di moduli appartenenti alla Zona termica 2). Tali superfici sono opache e dunque la trasmittanza ad esse associata è di 0.0.

5.4.2.8 Definizione del sistema HVAC e controllo termostatico

Il passo successivo è stato quello di impostare il funzionamento dei termostati – fissando determinate temperature di set-point – e del sistema *Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)*. Non essendo ancora presente un sistema reale di riscaldamento e raffrescamento, si è tenuto conto di un sistema ideale, definito nella sezione *ZoneHVAC:IdealLoadSystem*. In questo modo è stato possibile effettuare una simulazione che fornisse come output i carichi termici invernali ed estivi, senza effettuare un dimensionamento dei componenti.

Le "Schedule" si rivelano di estrema importanza per attuare il controllo termostatico e regolare il funzionamento del sistema HVAC. I due risultano strettamente correlati in quanto il sistema HVAC permette di attivare il riscaldamento o raffrescamento a seconda del periodo dell'anno e avviare così la regolazione della temperatura interna di ciascun ambiente, grazie ai set-point di temperatura impostati. Il controllo viene impostato attraverso l'inserimento, all'interno della "Schedule:Compact", di opportuni valori:

- 0: sistema non climatizzato.
- 1: sistema con solo riscaldamento a cui è associato un singolo Set Point Termostatico di riscaldamento ("*ThermostatSetpoint:SingleHeating*").
- 2: sistema con solo raffrescamento a cui è associato un singolo Set Point Termostatico di raffrescamento ("*ThermostatSetpoint:SingleCooling*").
- 3: sistema "a punto fisso" con riscaldamento e raffrescamento aventi stesso Set Point Termostatico ("*ThermostatSetpoint:SingleHeatingOrCooling*").

- 4: sistema “a banda morta” con riscaldamento e raffrescamento aventi Set Point Termostatici differenti (“*ThermostatSetpoint: DualSetPoint*”).

La “*Schedule*” impostata permette quindi di stabilire, per ciascun intervallo di tempo, quali tipologie di comando termostatico utilizzare per il controllo della temperatura interna di ciascuna zona e dunque fissare i periodi di riscaldamento e raffrescamento. Ecco dunque che tale “*Schedule*” determina il funzionamento del sistema HVAC.

E’ stato dunque stabilito per entrambe le zone termiche:

- Periodo di riscaldamento (controllo termostatico di tipo 1): dal 1 Gennaio al 30 Aprile e dal 1 Ottobre al 31 Dicembre.
- Periodo di raffrescamento (controllo termostatico di tipo 2): dal 1 Maggio al 31 Luglio e dal 31 Agosto al 30 Settembre.
- Periodo di spegnimento del sistema di condizionamento (controllo termostatico di tipo 0): dal 1 Agosto al 30 Agosto.

All’interno della sezione “*Zone:Control:Thermostat*”, sono stati creati invece due oggetti, relativi a ciascuno ambiente¹². A ciascuno di essi è stata associata la “*Schedule*” relativa al funzionamento del sistema HVAC nel campo “*Control Type Schedule Name*”. Nei campi “*Control Object*”, sono stati invece inseriti i controlli termostatici (di tipo “*SingleHeating*” e “*SingleCooling*”). Il funzionamento di ciascun termostato è stato impostato nelle classi “*ThermostatSetpoint:SingleHeating*” e “*ThermostatSetpoint:SingleCooling*”, associando a ciascuno una specifica “*Schedule*” che riporta i valori orari delle temperature di set-point.

Prima di effettuare questa procedura, definendo un sistema HVAC ideale, si è impostato un “*ThermostatSetpoint: DualSetPoint*”, a cui è associato un controllo termostatico di zona pari a 4. Si è dunque avviata la simulazione con tali parametri.

In questo tipo di procedura, si è potuto osservare che:

- Quando si andava al di sotto del Set Point invernale stabilito (21°C), il sistema di riscaldamento si attivava.
- Quando invece il Set Point estivo (30°C) veniva superato, entrava in funzione la modalità di raffrescamento.

Ciò sta a significare che, in condizioni invernali, si poteva verificare un raffrescamento mentre, in condizioni estive, un riscaldamento. Naturalmente questo non è in linea con un efficiente utilizzo di un sistema di condizionamento e con le esigenze di risparmio energetico ed elettrico.

Tramite la simulazione è stato generato un file del tipo “*Expand Objects Input Data*

¹² I periodi di riscaldamento e raffrescamento sono gli stessi per entrambi gli ambienti mentre le temperature di set-point impostate possono essere diverse, a seconda del funzionamento di ciascuna zona termica

File". Tale file ha consentito di impostare il corretto controllo termostatico di zona (descritto sopra) che prima non era stato possibile.

5.4.2.9 Infiltrazione

Per riprodurre l'effetto delle infiltrazioni di aria, dagli infissi, impianti, ecc. all'interno della simulazione, si è ipotizzata un'infiltrazione, per ciascuno ambiente, pari a 0,15 ricambi d'aria all'ora¹³, costante per tutto l'anno. Ciò significa che in un'ora il volume dell'aria contenuta nell'ambiente interno viene rinnovato in numero di volte pari a 0,15.

Questo valore è stato inserito all'interno della classe "*ZoneInfiltrationDesignFlowRate*", impostando come metodo di calcolo "*AirChanges/Hour*". L'effetto dell'infiltrazione di aria è quello di aumentare la quota di riscaldamento invernale, in quanto l'aria esterna ha una temperatura minore di quella dell'ambiente interno e diminuire la quota di raffrescamento estivo, in quanto l'aria esterna ha mediamente una temperatura minore – salvo in alcune ore della giornata – dell'aria dell'ambiente interno.

5.4.2.10 Ventilazione

A causa dell'assenza di un reale sistema di ventilazione meccanica e non conoscendo a priori quale impianto sarà effettivamente installato, l'effetto della ventilazione meccanica è stato tenuto in conto inserendo all'interno del programma una ventilazione di tipo naturale e associando ad essa un consumo elettrico in kWh per volume di aria ricambiato. Con riferimento alla normativa 10339, per ventilazione non residenziale, e in riferimento a uffici riunione, si è considerato un ricambio di aria di 10 l/s per persona (o $10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per persona), come riportato in Figura 5.19.

	($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per persona)
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI	
RESIDENZE A CARATTERE CONTINUATIVO	
Abitazioni civili:	
- soggiorni, camere da letto	11
- cucina, bagni, servizi	
-omissis-	
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	
uffici singoli	11
uffici open space	11
locali riunione	10
centri elaborazione dati	7
servizi	

Figura 5.19: Normativa 10339, ricambi di aria in m^3/s per persona

¹³ Valori tipici sono compresi tra 0,1 e 0,2 ricambi di aria all'ora.

Questo valore è stato inserito all'interno della classe "*ZoneVentilation:DesignFlowRate*", selezionando, tra le tipologie di ventilazione disponibili ("natural", "intake", "exhaust", "balanced") la ventilazione naturale. Essendo un valore dipendente dal numero di persone presente nell'ambiente, nell'intervallo di tempo considerato, gli è stato associato la "Schedule" delle persone.

5.5 Casi Studio

Questo paragrafo è dedicato alla descrizione di due principali casi studio, riferiti a differenti configurazioni di funzionamento del modulo abitativo, e presi in considerazione per un'analisi energetica ed elettrica. In particolare, il Caso studio 2 è stato suddiviso in tre sotto-casi per esaminare e confrontare in che modo la presenza o meno di ostacoli e il differente orientamento incidono sui consumi termici ed elettrici e sulla produzione fotovoltaica.

5.5.1 Caso 1

Questa configurazione fa riferimento a un funzionamento "a pieno carico" della Sala Riunioni e della Sala Studio. Le ipotesi formulate sono le seguenti:

- Apertura della Sala Studio e Sala Riunioni dalle ore 9:00 alle ore 17:00 nei giorni feriali. Chiusura, per entrambi i locali, nei week-end, dal 1 al 31 Agosto e durante le vacanze natalizie, supposte dal 24 Dicembre al 7 di Gennaio (inclusi).
- Presenza di 8 persone per tutte le ore di apertura, in entrambi gli ambienti.
- Accensione/Spengimento della climatizzazione invernale o estiva, secondo i periodi stabiliti nel Paragrafo 5.4.2.8.
- Controllo termostatico e temperature di set-point identiche per entrambe le zone termiche, sia in condizioni estive che invernali.

Dal 24 Dicembre al 7 Gennaio, per tutte le 24 ore, è stata impostata un temperatura di Set-Point pari a 15°C a causa della chiusura del modulo durante le vacanze natalizie. Questo è stato fatto anche per tutti i Week-end (Sabato e Domenica) del periodo di riscaldamento.

Questa scelta è motivata dal fatto che, durante periodi molto freddi, si deve provvedere comunque a un minimo riscaldamento dei due ambienti, per evitare che raggiungano temperature molto basse e che si originino problemi e/o guasti degli apparecchi elettrici e altri componenti contenuti all'interno.

Dall'8 Gennaio e per tutta la stagione di riscaldamento, per i giorni feriali, dalle 00:00 alle 6:00, la temperatura di set-point è di 15°C. Dalle 6:00 alle 19:00 la temperatura di Set-Point impostata è di 21 °C mentre dalle 19:00 alle 24:00 la temperatura impostata scende nuovamente a 15°C.

Per il periodo di raffrescamento estivo, nei giorni feriali, dalle 00:00 alle 6:00 è stata

impostata una temperatura di 30°C. Dalle 6:00 alle 19:00 è stata impostata una temperatura di 26°C mentre dalle 19:00 alle 24:00 pari a 30°C. Nei week-end è stata impostata invece una temperatura di 30°C.

Nel seguito è mostrata una tabella riassuntiva del controllo termostatico.

Tabella 5.4: Esempio di controllo termostatico per Sala Riunioni e Sala Studio - Caso 1

Periodo	Giorni	Orario	Temperatura interna [°C]
24/12- 7/1	Lun-Dom	0:00-24:00	15
8/1-30/4 1/10-23/12	Lun-Ven	0:00-6:00	15
		6:00-19:00	21
		19:00-24:00	15
	Sab-Dom	0:00-24:00	15
1/5-31/7 31/8-30/9	Lun-Ven	0:00-6:00	30
		6:00-19:00	26
		19:00-24:00	30
	Sab-Dom	0:00-24:00	30

- Postazioni PC per entrambi gli ambienti, ciascuna con potenza nominale di 100 W, funzionanti all'80% della potenza nominale, dipendenti dal numero di persone e funzionanti nelle sole ore di apertura degli ambienti. Il numero massimo di postazioni è pari a 8.
- Illuminazione Sala Studio: 10 lampade con potenza nominale di 30 W per un totale di 300 W¹⁴. Il funzionamento è in linea con l'apertura del locale.
- Illuminazione Sala Riunioni: 10 lampade con potenza nominale di 21 W per un totale di 210 W¹⁴. Il funzionamento è in linea con l'apertura del locale.
- Proiettore presente nella sola Sala Riunioni, con Potenza nominale di 150 W, funzionante al 50 % della potenza nominale nelle ore di funzionamento dell'ambiente.

¹⁴ La quota di potenza realmente utilizzata per l'illuminazione artificiale dell'ambiente dipende dalle condizioni climatiche esterne e dunque varia a seconda del mese e a seconda che il cielo è sereno o coperto.

Infine, è necessario precisare che per tale caso studio si è considerata la presenza degli ostacoli e un orientamento del modulo abitativo concorde con quello degli edifici circostanti. I moduli fotovoltaici hanno inoltre un'esposizione Sud-ovest per la Sala studio e Nord-ovest e Sud-est per la Sala riunioni.

5.5.2 Caso 2

La seconda configurazione, è relativa invece a un funzionamento con "carichi ridotti" ed è suddivisa in tre casi in base al differente orientamento del modulo abitativo e alla presenza o meno degli ostacoli circostanti.

Le ipotesi di funzionamento sono le seguenti:

- Apertura della Sala Studio dalle 9:00 alle 17:00 con 4 persone. Apertura della Sala Riunioni per tre ore al mattino dalle 9:00 alle 12:00 o per tre ore nel pomeriggio, dalle 14:00 alle 17:00, con 8 persone in entrambe le situazioni, a giorni alterni. Chiusura della Sala Studio e della Sala Riunioni nei week-end, dal 1 al 31 Agosto e durante le vacanze natalizie, ipotizzate dal 24 Dicembre al 7 di Gennaio.
- Accensione/Spengimento della climatizzazione invernale o estiva, secondo i periodi stabiliti nel Paragrafo 5.4.2.8.
- A causa dei differenti funzionamenti tra Sala Riunioni e Sala Studio, il controllo delle temperature interne viene attivato in orari diversi ma le temperature di set-point dei due locali restano le stesse.

Per la Sala Riunioni, in entrambe le configurazioni di funzionamento, dal 24 Dicembre al 7 Gennaio, per tutte le 24 ore, è stata impostata un temperatura di Set-Point pari a 15°. Questo è stato fatto anche per tutti i week-end del periodo di riscaldamento. Dall'8 Gennaio e per tutta la stagione di riscaldamento, per funzionamento mattiniero, per giorni feriali, dalle 00:00 alle 6:00, la temperatura di Set-Point è di 15°C. Dalle 6:00 alle 15:00 la temperatura di Set-Point impostata è di 21 °C mentre dalle 15:00 alle 24:00 la temperatura impostata scende nuovamente a 15°C. Per tutto il fine settimana il set-point è di 15 °C.

Per funzionamento pomeridiano, invece, dall'8 Gennaio e per giorni feriali di tutta la stagione di riscaldamento, dalle 00:00 alle 6:00, la temperatura di set-point è di 15°C. Dalle 11:00 alle 19:00 la temperatura di Set-Point impostata è di 21 °C mentre dalle 19:00 alle 24:00 la temperatura impostata scende nuovamente a 15°C. Per tutto il fine settimana il set-point è di 15 °C.

Per il raffrescamento estivo, le fasce orarie di controllo della temperatura interna rimangono invariate rispetto al periodo di riscaldamento, sia nella configurazione mattutina che pomeridiana, con la sola modifica delle temperature di set-point che passano da 15°C a 30°C e da 21°C a 26°C.

Per quanto riguarda invece la Sala Studio, le temperature di set-point restano invariate rispetto al Caso studio 1.

La logica di utilizzo delle apparecchiature elettriche è la medesima del Caso Studio 1, in accordo tuttavia con l'apertura degli ambienti.

Descritta la logica di funzionamento comune a tutti e tre i casi analizzati, è utile indicarne le caratteristiche:

- Caso con ostacoli e orientamento del modulo abitativo concorde e allineato con gli edifici circostanti, denominato "Caso allineato". In questo caso i moduli fotovoltaici hanno un'esposizione Sud-ovest per la Sala studio e Nord-ovest e Sud-est per la Sala riunioni.
- Caso senza ostacoli e orientamento del modulo abitativo concorde e allineato con gli edifici circostanti, denominato "Caso senza ostacoli". I moduli fotovoltaici sono orientati come il caso precedente.
- Caso con ostacoli e orientamento del modulo abitativo secondo le direzioni dei punti cardinali, ottenuto ruotando l'edificio di -45° rispetto all'orientamento specificato negli altri punti. E' stato denominato "Caso non allineato". In questo caso i moduli fotovoltaici hanno un'esposizione Sud per la Sala studio e Ovest ed Est per la Sala riunioni.

5.6 Calcolo di Progetto Invernale e Estivo

Per prima cosa, si è proceduto con il dimensionamento vero e proprio della pompa di calore. Il dimensionamento è stato effettuato sulla base del Caso 1, in quanto tiene conto di un funzionamento massimo ipotetico per entrambi gli ambienti.

Per il dimensionamento della pompa di calore in assetto invernale si tiene conto del calcolo di progetto invernale, prescritto dalla norma UNI EN 12831. Questo consente la valutazione dei carichi termici sensibili di picco per riscaldamento nel giorno più freddo dell'anno, stabilito il 15 di Gennaio, e nelle condizioni più gravose, ossia in assenza di apporti di calore interni e solari. Le condizioni a cui si fanno riferimento sono stazionarie in quanto si assume che la temperatura esterna sia costante durante il giorno. Facendo riferimento alla norma UNI 5364, che fornisce le temperature esterne invernali di progetto per diverse località, per Torino si è presa in considerazione un temperatura di -8°C (Figura 5.20).

Torino	-8	Reggio Emilia	-5
Alessandria	-8	Ancona	-2
Asti	-8	Ascoli Piceno	-2
Cuneo	-10	Macerata	-2

Figura 5.20: Temperature esterne di progetto per diverse località, stabilite dalla normativa UNI 5364

Si è inoltre imposta una velocità del vento di 0.8 m/s con direzione prevalente Nord-Est come riportato dalla norma UNI 10349, in Figura 5.21.

Infine, si è assunta un'umidità relativa pari all'80%, tipica della stagione invernale a Torino.

Città o Località	Altitudine (m)	Zona di vento	Velocità media (m/s)	Direzione prevalente
Ancona	16	2	3	W
Aosta	583	2	2,6	N
Bari	5	2	3,5	W
Bologna	54	1	1,6	SW
Bolzano	262	1	0,9	S
Cagliari	4	3	4,0	NW
Firenze	40	2	1,4	NE
Genova	19	3	3,8	NE
Milano	122	1	1,1	SW
Napoli	17	3	2,3	NE
Palermo	14	3	3,6	SW
Reggio Calabria	15	3	3,8	N
Roma	20	2	2,6	SW
Salerno	4	3	1,8	SW
Torino	239	1	0,8	NE

Figura 5.21: Norma UNI 10349, caratteristiche del vento

Per quanto riguarda il calcolo di progetto estivo, si è proceduto con la valutazione dei carichi termici sensibili di picco per raffrescamento, nel giorno più caldo dell'anno, assunto il 15 di Luglio, e nelle condizioni più gravose, presenza di apporti di calore interni e solari. In questo caso, le condizioni analizzate sono in regime dinamico in quanto la temperatura esterna è considerata variabile a causa della forte influenza della radiazione solare. Secondo la normativa UNI 10339, la temperatura di riferimento massima, registrata dalla stazione meteorologica di Torino Caselle, è 30.5°C. La temperatura varia sinusoidalmente nell'arco della giornata con un'escursione termica assunta pari a 11°C. La velocità del vento è sempre assunta pari a 0.8 m/s con direzione prevalente Nord-Est. Inoltre è stata impostata un'umidità relativa del 50% e umidità assoluta di 0.0164 kg_v/kg_a, come mostrato in Figura 5.22.

Località (stazione metereologica)	T _{bse} [°C]	ΔT _{ge} [°C]	UR _e [%]	X 10 ⁻³ [kg/kg]	H [m s.l.m.]	Mese più caldo
ALESSANDRIA	30,5	11,0	50	13,7	95	luglio
ASTI	32,0	11,0	50	15,0	152	luglio-agosto
CUNEO	29,0	12,0	56	13,7	536	luglio
TORINO CASELLE	30,5	11,0	50	16,4	282	luglio

Figura 5.22: Dati climatici estivi di progetto secondo UNI 10339

Nel software *EnergyPlus* si è dunque eseguita la simulazione per i due giorni specificati, inseriti all'interno della classe *SizingPeriod:DesignDay*, definendoli come giorni di progetto invernale ed estivo.

Il File dei dati climatici non è stato più preso in considerazione e i dati relativi alle condizioni climatiche e alle caratteristiche della località sono stati inseriti manualmente, impostando:

- Latitudine: 45,7°
- Longitudine: 7,43°
- Time Zone: 1 h
- Altitudine: 239 m

La presenza o meno della radiazione solare è stata tenuta in conto grazie al *SolarModelIndicator*, impostato sulla condizione *ASHRAEClearSky*, pari a 0 per il giorno di progetto invernale, in assenza di radiazione solare, e pari a 1 per il giorno di progetto estivo.

I materiali e le caratteristiche dell'edificio sono rimaste invariate mentre si sono usate le *Schedule* per la definizione del funzionamento dei carichi interni nell'edificio.

Per il 15 di Gennaio, come ripetuto più volte, si sono considerati nulli gli apporti solari e interni per i due ambienti. Per il 15 di Luglio invece, facendo riferimento ai reali orari di apertura del modulo (dalle 9:00 alle 17:00), si è considerata la presenza della persone e il funzionamento di luci, postazioni elettriche e proiettore, secondo la logica definita nel Caso 1.

Per quanto riguarda i set-point di temperatura interna, si è fatto riferimento alla norma UNI EN 12831, la quale definisce dei valori di temperatura interna a seconda della destinazione d'uso dell'edificio.

Per ambienti adibiti ad aule scolastiche e sale conferenza, come nel caso in esame, per le condizioni invernali, si fa riferimento a una temperatura di 20°C mentre per le condizioni estive a una temperatura di 26°C. Inoltre, il controllo termostatico delle zone è stato impostato pari a 1 (*ThermostatSetpoint:SingleHeating*) per il giorno di progetto invernale e pari a 2 (*ThermostatSetpoint:SingleCooling*) per il giorno di progetto estivo.

5.7 Determinazione dei fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento

Per il calcolo dei consumi termici ed elettrici relativi alla climatizzazione invernale ed estiva si è proceduto considerando il funzionamento relativo ai due Casi Studio elencati nel Paragrafo 5.5.

Per ciascuna configurazione è stata avviata una simulazione su *EnergyPlus*. Gli output ottenuti forniscono i carichi termici sensibili ora per ora, espressi in W, e il volume orario di aria ricambiato per mezzo della ventilazione meccanica, espresso in m³.

I consumi elettrici per riscaldamento e raffrescamento sono stati determinati considerando un COP fittizio di una generica pompa di calore. Nelle condizioni invernali si è ipotizzato un COP medio di 3, mentre per il calcolo dei consumi elettrici per raffrescamento si è considerato un COP medio di 3,5. Questi valori sono schematizzati nella seguente tabella.

Tabella 5.5: COP fittizi per il calcolo dei consumi elettrici per riscaldamento e raffrescamento

COP fittizio – stagione di riscaldamento	COP fittizio – stagione di raffrescamento
3	3,5

Per il calcolo dei consumi elettrici associati a una possibile ventilazione meccanica, si è preso in esame il consumo elettrico specifico di aria movimentata, associato a un impianto di ventilazione meccanica a semplice flusso di estrazione, come mostrato nella Figura 5.23. Il valore è pari a 0,25 kWh_e per metro cubo di aria movimentata. Tale valore è stato moltiplicato per il volume di aria ricambiato, ottenuto come *output* della simulazione energetica.

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

Figura 5.23: Consumo elettrico per ventilazione meccanica [kWh_e]

5.8 Determinazione della generazione fotovoltaica

Avendo definito tutti i parametri e gli input necessari per avviare la simulazione su *EnergyPlus*, è stato impostato come ulteriore *output* della simulazione, la radiazione oraria totale incidente, espressa in W/m^2 , su ciascuna stringa di moduli fotovoltaici, per calcolare così la produzione di energia elettrica.

Per determinare la radiazione totale incidente su una determinata superficie (inclinata o orizzontale) e le sue componenti, *EnergyPlus* utilizza una serie di modelli di calcolo, sfruttando i dati disponibili nel *Weather File*.

Dal File dei dati climatici in formato CSV, è stato inoltre possibile reperire i valori di temperatura esterna dell'ambiente e calcolare così la temperatura della cella fotovoltaica, nelle possibili configurazioni di orientamento dei moduli.

La formula utilizzata per il calcolo è la seguente:

$$T_{cella} = T_{aria} + (NOCT - 20^{\circ}C) \cdot \frac{G \left(\frac{W}{m^2}\right)}{800 \left(\frac{W}{m^2}\right)} \quad (5.1)$$

In cui:

- T_{cella} è la temperatura di funzionamento della cella fotovoltaica [$^{\circ}C$].
- T_{aria} è la temperatura esterna dell'aria [$^{\circ}C$].
- *NOCT* (*Nominal Operating Cell Temperature*): è la temperatura di equilibrio della cella fotovoltaica [$^{\circ}C$] quando opera sotto le condizioni di temperatura dell'ambiente pari a $20^{\circ}C$, di Irradianza pari a $800 W/m^2$, velocità del vento di $1 m/s$ e *Air mass* pari a $1,5$. I valori tipici sono compresi tra $42^{\circ}C$ e $50^{\circ}C$. È stato assunto un *NOCT* pari a $50^{\circ}C$.
- G è l'Irradianza globale su una specifica superficie orizzontale o inclinata nelle varie direzioni: Sud, Sud-est, Sud-ovest, Nord-ovest, ost, ovest [W/m^2].

Nota la temperatura della cella ora per ora, si è calcolata la potenza elettrica generata dall'impianto fotovoltaico attraverso la seguente formula:

$$P_{elettrica} = P_{nominale} \cdot \kappa_{temp} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot \eta_{plus} \cdot \eta_{PCU} \quad (5.2)$$

Dove:

- $P_{nominale}$ è la potenza nominale dell'impianto [kW].
- κ_{temp} è il coefficiente che tiene conto della riduzione della potenza con la temperatura, espresso come:

$$1 - \gamma \cdot \Delta T \cdot (T_{cella} - 25^{\circ}C) \quad (5.3)$$

In cui γ è il coefficiente di riduzione della potenza con la temperatura, pari a $\frac{0,45\%}{^{\circ}C}$ mentre ΔT è pari alla differenza tra la temperatura di cella e $25^{\circ}C$.

- G è l'Irradianza globale nelle varie direzioni: Sud, Sud-est, Sud-ovest, Nord-ovest, Est, Ovest [W/m^2].
- G_{STC} è l'Irradianza in *Standard Test Condition*, pari a $1000 W/m^2$.
- η_{plus} è il rendimento addizionale che tiene conto delle perdite lato DC per effetto Joule, perdite per riflessione, sporcizia e *mismatch*. Il suo valore è di 0,92.
- η_{PCU} è il rendimento della PCU, pari a 0,95, espresso come:

$$\eta_{MPPT} \cdot \eta_{DC-AC} \quad (5.4)$$

In cui η_{MPPT} rappresenta il rendimento del *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), pari a 0,99, mentre il termine η_{DC-AC} rappresenta il rendimento di conversione lato DC-AC, pari a 0,96.

5.9 Determinazione delle quote di autoconsumo e autoproduzione

Ottenuta la potenza elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici, è stata effettuata una valutazione sui consumi elettrici relativi ai due ambienti. Si è voluta effettuare una simulazione basandosi su un anno fittizio riferito a quello dei dati climatici del software *EnergyPlus*. La simulazione è stata fatta partire impostando Sabato come primo giorno dell'ipotetico anno e seguendo questa logica per la valutazione dei fine settimana.

Come caso di funzionamento ci si è riferiti ai sotto-casi del Caso 2. Di seguito è riportata una sintesi del funzionamento dei carichi elettrici per ciascun ambiente:

Sala Riunioni:

- Funzionamento alternato dalle 9:00 alle 12:00 o dalle 14:00 alle 17:00 con 8 persone presenti.
- Consumo elettrico postazioni per PC: 80 W/persona.
- Consumo elettrico proiettore: 75 W.
- Consumo elettrico sistema di illuminazione (potenza nominale 210 W): dipendente dalla frazione di cielo sereno o coperto.

Sala Studio:

- Funzionamento dalle 9:00 alle 17:00 con 4 persone presenti.
- Consumo elettrico postazioni per PC: 80 W/persona.
- Consumo elettrico sistema di illuminazione (potenza nominale 300 W): dipendente dalla frazione di cielo sereno o coperto.

A tali consumi elettrici sono stati aggiunti quelli relativi alla pompa di calore e all'ipotetica ventilazione meccanica, calcolati tramite il software *EnergyPlus*, come spiegato nel paragrafo 5.7.

Il software *Matlab* è stato utilizzato per l'azzeramento dei consumi elettrici nei periodi di chiusura degli ambienti, ossia nei fine settimana, nel mese di Agosto e durante le vacanze natalizie.

Per quanto riguarda il consumo elettrico dell'illuminazione, derivante da calcoli eseguiti sul software *DIALux*, è stato considerato un differente consumo a seconda delle condizioni di illuminazione naturale del luogo e variabile mese per mese. Per tenere conto di tali variazioni, a seconda dunque che il cielo fosse sereno o coperto, è stato considerato dal file dei dati climatici del software *EnergyPlus* un parametro che tiene conto della quantità di cielo che viene oscurato o parzialmente oscurato da nuvole o altri fenomeni, denominato *Opaque Sky Cover*. Espresso in una scala che va da 0 a 10, è stato impostato che un valore compreso tra 0 e 5.0 (escluso) indicasse una condizione di cielo sereno, un valore compreso tra 5.0 (incluso) e 10.0 indicasse invece una situazione in cui il cielo

fosse coperto.

In questo modo è stato costruito un anno di simulazione che tenesse conto della variazione dei consumi elettrici ora per ora.

In seguito si sono confrontati, ora per ora, i valori dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico e dell'energia elettrica consumata. Questo è stato fatto per calcolare la quota di autoproduzione e autoconsumo, come spiegato nel Paragrafo 2.3.2.

Riassumendo:

- Autoconsumo (*self-consumption*): esprime la percentuale di energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico effettivamente utilizzata per coprire i consumi elettrici.
- Autoproduzione o autosufficienza (*self-production*): indica la percentuale di consumi elettrici coperti dall'energia elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici.

In questa ottica, solo un perfetto accoppiamento tra produzione e consumo permetterebbe a queste due quantità di essere entrambe pari al 100%.

Capitolo 6

6 Risultati

In questo capitolo sono riportati i risultati relativi all'analisi termo-energetica ed elettrica del modulo abitativo *eco>Home*.

Nella prima parte si fa riferimento alla simulazione energetica effettuata su *EnergyPlus*, che ha consentito il dimensionamento della pompa di calore e il calcolo dei fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento per ciascun ambiente, sia per il Caso 1 che per il Caso 2. In seguito è riportata l'analisi della generazione fotovoltaica, dei consumi elettrici e la valutazione delle quote di autoconsumo e autosufficienza per ciascun ambiente, per i tre sotto casi del Caso 2. Infine si è eseguito un confronto dei risultati ottenuti.

Per chiarezza si riepilogano qui di seguito i Casi studio oggetto dell'analisi, descritti nel Paragrafo 5.5.

Caso 1:

- Funzionamento del modulo “a pieno carico”, secondo le modalità espone nel Paragrafo 5.5.1.
- Orientamento del modulo abitativo concorde e allineato con gli edifici circostanti.
- Presenza degli ostacoli.
- Moduli fotovoltaici orientati a Sud-ovest per la Sala Studio e Nord-Ovest e Sud-est per la Sala Riunioni.

Caso 2, con funzionamento del modulo a “carichi ridotti” e suddiviso in:

- Caso con ostacoli e orientamento del modulo abitativo concorde e allineato con gli edifici circostanti, denominato “Caso allineato”. I moduli fotovoltaici sono orientati a Sud-ovest per la Sala Studio e Nord-Ovest e Sud-est per la Sala Riunioni.
- Caso senza ostacoli e orientamento del modulo abitativo concorde e allineato con gli edifici circostanti, denominato “Caso senza ostacoli”. I moduli fotovoltaici sono orientati a Sud-ovest per la Sala Studio e Nord-Ovest e Sud-est per la Sala Riunioni
- Caso con ostacoli e orientamento del modulo abitativo secondo le direzioni dei punti cardinali, ottenuto ruotando l'edificio di -45° rispetto all'orientamento specificato negli altri punti. E' stato denominato “Caso non allineato”. I moduli fotovoltaici sono orientati a Sud per la Sala Studio e Ovest e Est per la Sala Riunioni.

6.1 Calcolo di Progetto Invernale ed Estivo

Qui di seguito, sono riportati i valori orari di temperatura esterna di progetto, temperatura interna di ciascuna zona termica e i carichi termici sensibili per riscaldamento e raffrescamento, rispettivamente nelle condizioni di progetto invernale ed estivo, determinati per il Caso 1.

Per quanto riguarda il calcolo di progetto invernale, la simulazione svolta con *EnergyPlus* è in realtà una simulazione in regime stazionario, avendo impostato una temperatura esterna costante, pari a -8°C . Le temperature interne e i carichi termici per riscaldamento, costanti per tutto il periodo di simulazione, sono rispettivamente pari a 3966 W_t^{15} per la Sala Riunioni e 4432 W_t per la Sala Studio.

Tabella 6.1: Risultati del calcolo di progetto invernale

Data	Temperatura esterna [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura interna Sala Riunioni [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura interna Sala Studio [$^{\circ}\text{C}$]	Carico sensibile riscaldamento Sala Riunioni [W_t]	Carico sensibile riscaldamento Sala Studio [W_t]
01/15 01:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 02:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 03:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 04:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 05:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 06:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 07:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 08:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 09:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 10:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 11:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 12:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 13:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 14:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 15:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 16:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 17:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 18:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 19:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 20:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 21:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 22:00:00	-8	20	20	3966	4432

¹⁵ Il pedice t nell'unità di misura indica che si tratta di una potenza di riscaldamento.

01/15 23:00:00	-8	20	20	3966	4432
01/15 24:00:00	-8	20	20	3966	4432

Nel calcolo di progetto estivo la simulazione è invece in regime dinamico, ossia la temperatura esterna è variabile, con escursione termica di 11°C, e con essa la temperatura interna e i carichi termici estivi. I carichi di picco per raffrescamento, rispettivamente per Sala Studio e Sala Riunioni sono pari a 2271 W_f e 2535 W_f¹⁶.

Tabella 6.2: Risultati del calcolo di progetto estivo

Data	Temperatura esterna [°C]	Temperatura interna Sala Riunioni [°C]	Temperatura interna Sala Studio [°C]	Carico sensibile raffrescamento Sala Riunioni [W _f]	Carico sensibile raffrescamento Sala Studio [W _f]
07/15 01:00:00	21	26	26	86	74
07/15 02:00:00	21	26	26	53	32
07/15 03:00:00	20	26	26	24	3
07/15 04:00:00	20	26	26	3	0
07/15 05:00:00	20	26	26	0	0
07/15 06:00:00	20	26	25	34	0
07/15 07:00:00	20	26	25	505	0
07/15 08:00:00	22	26	26	1082	0
07/15 09:00:00	23	26	26	1329	9
07/15 10:00:00	25	26	26	2535	1377
07/15 11:00:00	27	26	26	2268	1504
07/15 12:00:00	29	26	26	2097	1635
07/15 13:00:00	30	26	26	2036	1820
07/15 14:00:00	30	26	26	2007	2085
07/15 15:00:00	31	26	26	1989	2271
07/15 16:00:00	30	26	26	1965	2271
07/15 17:00:00	29	26	26	1927	2233
07/15 18:00:00	28	26	26	578	749
07/15 19:00:00	27	26	26	479	584
07/15 20:00:00	26	26	26	368	431
07/15 21:00:00	24	26	26	277	321
07/15 22:00:00	23	26	26	216	241
07/15 23:00:00	23	26	26	166	176
07/15 24:00:00	22	26	26	124	122

¹⁶ Il pedice *f* indica che si tratta di una potenza frigorifera.

Gli andamenti delle temperature interne, dei carichi termici e della temperatura esterna per il calcolo di progetto estivo sono riportati in Figura 6.1.

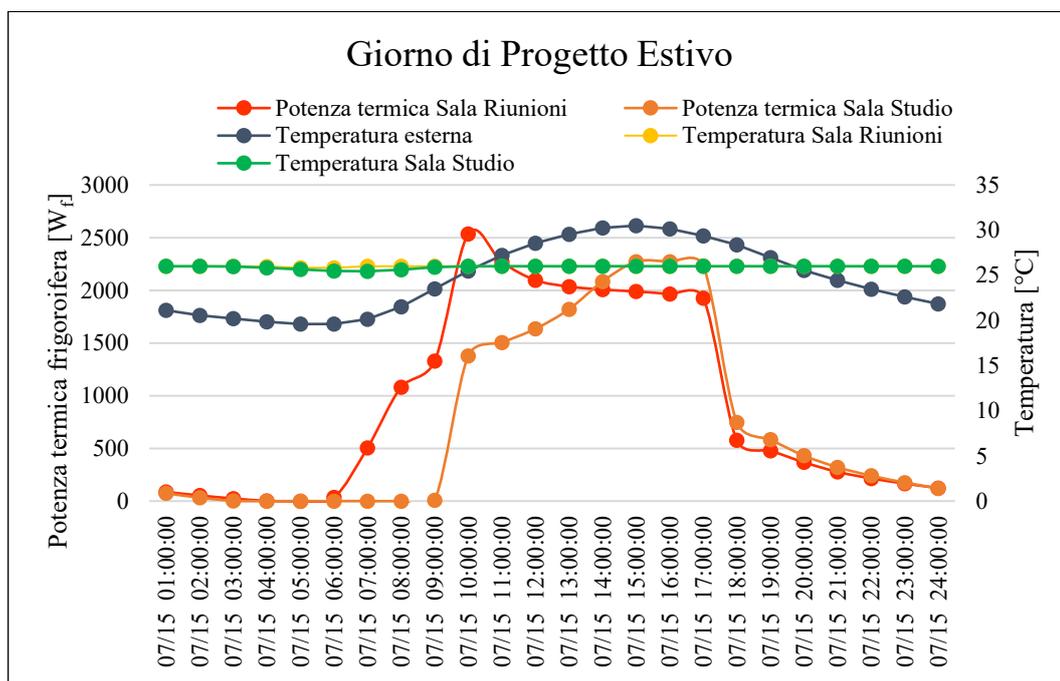


Figura 6.1: Andamento temperature e carichi termici per il giorno di progetto estivo

Per quanto riguarda la temperatura esterna, il minimo si verifica alle ore 6:00, con una temperatura di circa 19°C. La temperatura massima si registra invece intorno alle 14:00, pari a 30°C. Le temperature interne, rimangono pressoché costanti e pari al set-point di 26°C. Il carico termico per raffreddamento della Sala Riunioni ha un picco intorno alle 10:00, quando la temperatura esterna sta aumentando. Anche gli apporti di calore solari e interni determinano un aumento della temperatura interna del locale. La Sala Studio registra invece il picco di potenza alle 15:00, in quanto, essendo un ambiente di dimensioni maggiori, risente in misura minore dell'aumento della temperatura esterna e degli apporti di calore solari e interni.

Dunque, per riassumere, i risultati ottenuti attraverso il calcolo di progetto invernale ed estivo sono riportati in Tabella 6.3.

Tabella 6.3: Potenze termiche ed elettriche di picco in condizioni di progetto invernale ed estivo – Caso studio 1

	Sala Riunioni	Sala Studio
Potenza termica di picco in condizioni di Progetto Invernale [kW _t]	3,97	4,43
Potenza termica di picco in condizioni di Progetto Estivo [kW _f]	2,54	2,27
Potenza elettrica di picco in condizioni di Progetto Invernale [kW _e]	1,32	1,5
Potenza elettrica di picco in condizioni di Progetto Estivo [kW _e]	0,72	0,65

Le potenze termiche di picco associate al calcolo di progetto invernale risultano più gravose rispetto a quelle di progetto estivo. Questo è dovuto alla considerazione dell'infiltrazione e ventilazione naturale nella simulazione per il calcolo di progetto invernale, determinando un aumento dei carichi termici.

Si può dunque evincere che un'ipotetica pompa di calore installata in ciascuno dei due ambienti, dovrà possedere una potenza termica di circa 4 kW_t per Sala Riunioni e 4,5 kW_t per Sala Studio e una potenza frigorifera di 2,5 kW_f per Sala Riunioni e 2,2 kW_f per Sala Studio.

Si è considerato inoltre il modulo ruotato di 45° in senso antiorario, rispetto al caso originale, e si è eseguito nuovamente il calcolo di progetto invernale ed estivo. I risultati totali ottenuti sono riportati in Tabella 6.4.

Tabella 6.4: Potenze termiche ed elettriche di picco in condizioni di progetto invernale ed estivo - rotazione di 45° del modulo in senso antiorario – Caso 1

	Sala Riunioni	Sala Studio
Potenza termica di picco in condizioni di Progetto Invernale [kW _t]	3,97	4,43
Potenza termica di picco in condizioni di Progetto Estivo [kW _f]	2	2,53
Potenza elettrica di picco in condizioni di Progetto Invernale [kW _e]	1,32	1,5
Potenza elettrica di picco in condizioni di Progetto Estivo [kW _e]	0,57	0,72

Rispetto al caso precedente, le potenze termiche per riscaldamento rimangono invariate mentre diminuisce la potenza termica per raffrescamento della Sala Riunioni e aumenta quella della Sala Studio. Ciò che cambia tra un caso e l'altro è il differente orientamento del modulo e le uniche variabili che possono influire sui carichi termici sono gli apporti solari gratuiti, essendo le condizioni di funzionamento le stesse. L'invarianza delle potenze termiche per riscaldamento, è giustificata dal fatto che nel caso invernale si considerano nulli gli apporti di calore solari e dunque essi non hanno alcuna influenza sui carichi termici per riscaldamento. Quindi la potenza termica della pompa di calore rimane la stessa, pari a 4 kW_t per Sala Riunioni e $4,4 \text{ kW}_t$ per Sala Studio e una potenza frigorifera pari a 2 kW_f per Sala Riunioni e $2,5 \text{ kW}_f$ per Sala Studio.

6.2 Calcolo dei fabbisogni energetici invernali ed estivi

6.2.1 Caso 1

In Tabella 6.5 è possibile visualizzare i fabbisogni termici annuali per riscaldamento e raffrescamento associati alla Sala Riunioni e alla Sala Studio.

Come si può notare, nella situazione invernale, il fabbisogno annuale di energia termica per riscaldamento della Sala Studio è pari a 2342 kWh_t annui e ha un peso maggiore rispetto a quello della Sala Riunioni, pari a 1256 kWh_t annui. Questo può trovare giustificazione in diversi fattori. Innanzitutto le dimensioni dell'ambiente contribuiscono a una maggiore energia per riscaldamento. Essendo la Sala Studio un ambiente con una superficie di circa 43 m^2 , è evidente che questo fattore gioca un ruolo decisivo nella maggiore richiesta annuale di energia, in quanto la superficie disperdente è maggiore rispetto alla Sala Riunioni.

D'altra parte, si può notare come nel periodo estivo, sia invece la Sala Riunioni a richiedere un'energia annuale maggiore per il raffrescamento, pari a circa 794 kWh_f annui, contro i 537 kWh_f annui della Sala Studio. L'ambiente, con una superficie di 23 m^2 , risente maggiormente degli apporti di calore – sia interni sia solari - rispetto alla Sala Studio. A parità di condizioni di funzionamento, gli apporti di calore gratuiti all'interno di un ambiente più piccolo determinano un maggiore aumento del fabbisogno per raffrescamento rispetto a un ambiente con volume maggiore. Inoltre tale discostamento è da ricercarsi nella diversa esposizione dei due ambienti. Essendo la Sala Riunioni esposta a Sud-Est, quest'ultima avrà degli apporti di calore solari maggiori rispetto a quelli della Sala Studio, con esposizione Nord-Ovest. Mentre in inverno questo porta a un minore carico termico per riscaldamento, in estate i consumi per il raffrescamento sono maggiori.

Sono stati inoltre riportati i consumi elettrici annuali per ciascun ambiente, proporzionali a quelli termici. Valgono dunque le medesime considerazioni.

Tabella 6.5: Fabbisogni termici e consumi elettrici per riscaldamento e raffrescamento per Sala Riunioni e Sala Studio – Caso 1.

	Sala Riunioni		Sala Studio	
	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo
Fabbisogno termico annuo [kWh/a]	1256	794	2342	537
Fabbisogno termico annuo per m² [kWh/a m²]	53	34	55	13
Consumo elettrico annuo [kWh_e/a]	419	227	781	153
Consumo elettrico annuo per m² [kWh_e/a m²]	18	10	18	4

Tabella 6.6: Consumo Elettrico per ventilazione meccanica – Caso studio 1

	Sala Riunioni	Sala Studio
Consumo elettrico annuale per ventilazione meccanica [kWh_e/a]	135	135

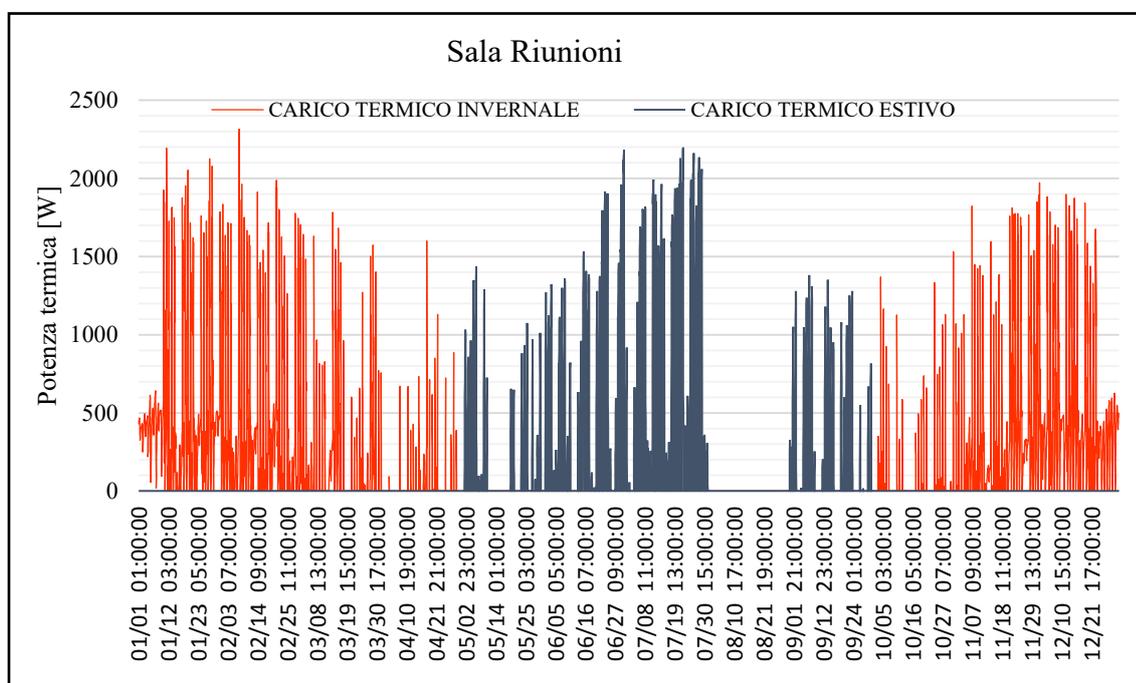


Figura 6.2: Carichi termici invernali ed estivi della Sala Riunioni – Caso 1

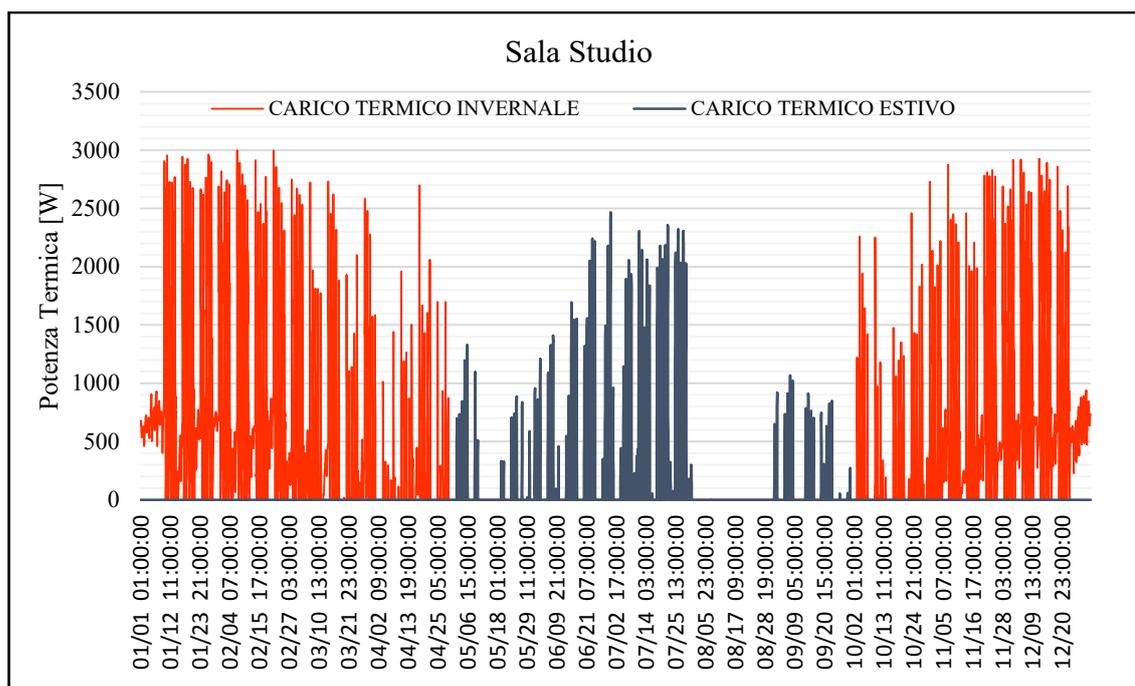


Figura 6.3: Carichi termici invernali ed estivi della Sala Studio – Caso 1

In Figura 6.2 e Figura 6.3 sono riportati gli andamenti annuali dei carichi termici invernali ed estivi relativi a ciascuna zona termica. I consumi elettrici e termici mensili sono mostrati in Tabella 6.7, mentre in Figura 6.4 sono riportati i consumi termici mensili per entrambi gli ambienti.

Tabella 6.7: Fabbisogni termici e consumi elettrici mensili dei due ambienti - Caso 1

		Sala Riunioni		Sala Studio	
		Consumi termici [kWh]	Consumi elettrici [kWh _e]	Consumi termici [kWh]	Consumi elettrici [kWh _e]
	Mese				
Stagione di riscaldamento	Gennaio	327	109	565	188
	Febbraio	228	76	427	142
	Marzo	130	43	260	87
	Aprile	24	8	80	27
Stagione di raffrescamento	Maggio	91	26	46	13
	Giugno	228	65	161	46
	Luglio	348	99	275	79
	Agosto	3	1	0	0
	Settembre	123	35	55	16
Stagione di riscaldamento	Ottobre	38	13	101	34
	Novembre	192	64	367	122
	Dicembre	317	106	542	181

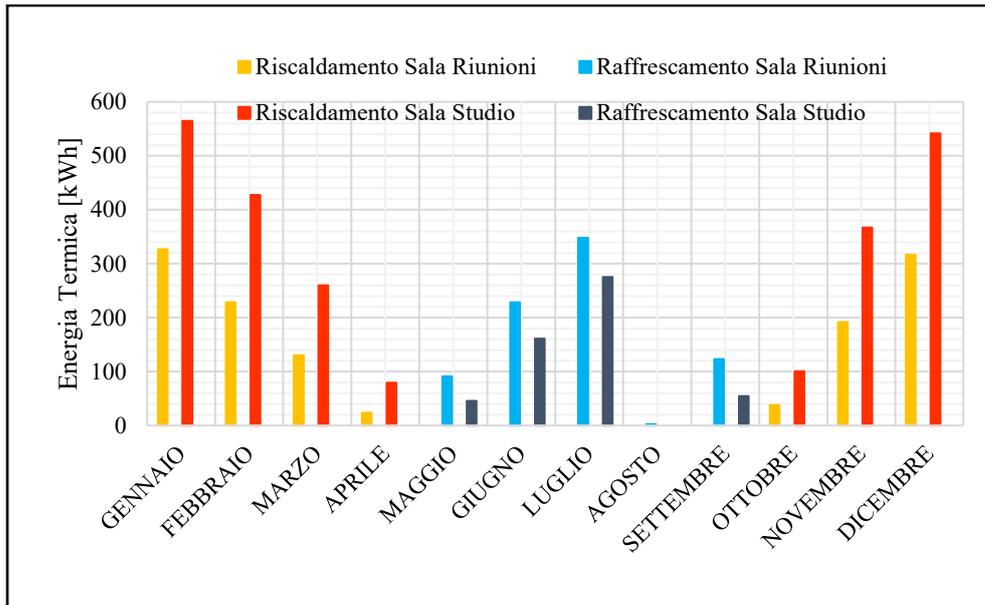


Figura 6.4: Fabbisogni termici mensili per riscaldamento e raffrescamento per Sala Studio e Sala Riunioni [kWh] – Caso 1

Un picco di potenza termica per riscaldamento della Sala Studio si verifica il 21 Febbraio alle ore 7:00 ed è pari a $3kW_t$. Per la Sala Riunioni invece, il picco di potenza raggiunto in quell'ora è di circa $2kW_t$ (Figura 6.5).

Le dimensioni della Sala Studio contribuiscono sicuramente a una maggiore potenza termica. In secondo luogo, come detto in precedenza, l'ambiente risulta esposto a Nord-Ovest, per cui la quantità di apporti solari gratuiti sarà minore rispetto alla Sala Riunioni. Infine, esattamente alle ore 7:00 del 21 Febbraio, si raggiungono delle condizioni molto rigide di temperatura, pari a $-5^\circ C$, che provocano una maggiore richiesta di energia per riscaldamento.

Nella Figura 6.5 è possibile visualizzare gli andamenti dei carichi termici per il giorno considerato, le temperature interne relative alle due zone termiche e le fluttuazioni della temperatura esterna.

Gli andamenti delle temperature interne dei due ambienti coincidono, in quanto il controllo termostatico di zona è il medesimo. Dalle ore 6:00, da una temperatura interna di $15^\circ C$ si passa a una temperatura di $21^\circ C$ fino alle 19:00, per poi nuovamente ristabilirsi al set-point di $15^\circ C$, dalle 19:00 alle 24:00. Si è inoltre notata l'influenza che la temperatura di mandata dell'aria del sistema HVAC ha sulle temperature interne dei due ambienti. Lasciando, per il riscaldamento, un valore di $50^\circ C$ di default, le temperature interne raggiungono i $26-28^\circ C$. Si è scelta dunque una temperatura di mandata pari a $35^\circ C$, per evitare alti consumi e sprechi energetici, rimandando a un'ulteriore analisi una gestione più efficiente del controllo termostatico. Così facendo, i valori di temperatura interna si attestano intorno ai $22-21^\circ C$, in accordo con il Set-Point di temperatura

impostato. Per il caso estivo, si è invece lasciato il valore di default di temperatura di mandata, pari a 13°C.

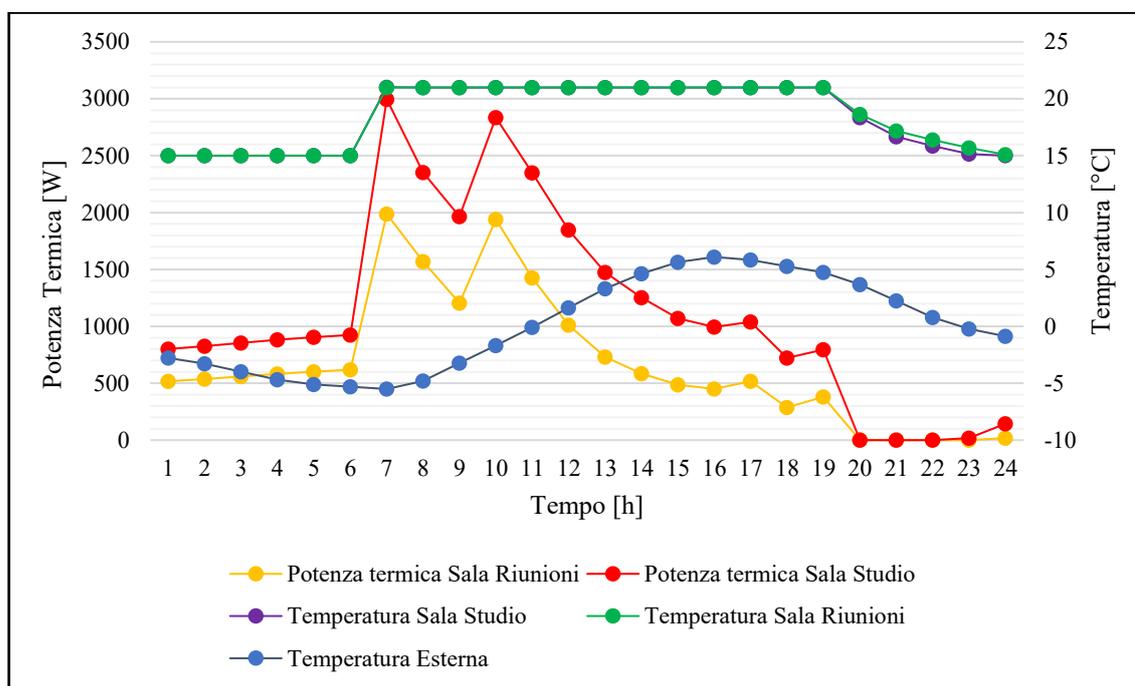


Figura 6.5: Andamento Carichi e temperature per il 21/02 – Caso 1

In Figura 6.6 è invece riportata la distribuzione delle temperature nell'arco del periodo di riscaldamento, per entrambi gli ambienti. Sono state escluse dall'analisi le vacanze natalizie, il cui set-point di temperatura è sempre impostato sui 15 °C. Dunque si è considerato il periodo dal 10 Gennaio al 30 Aprile e dal 1 Ottobre al 23 Dicembre. Come si può notare, le temperature prevalenti sono relative ai due set-point, rispettivamente di 15°C e di 21°C. La paragonabile frequenza tra le due temperature è giustificata da differenti fattori. La temperatura esterna molto bassa, determina una dispersione repentina del calore all'interno dei due ambienti. Alle 19:00, quando il set-point si stabilisce dai 21°C ai 15°C, le temperature interne dei due ambienti si ristabiliscono velocemente attorno al set point di 15°C. Inoltre bisogna tenere conto che nel fine settimana la temperatura è di 15 °C per tutte le 48 ore.

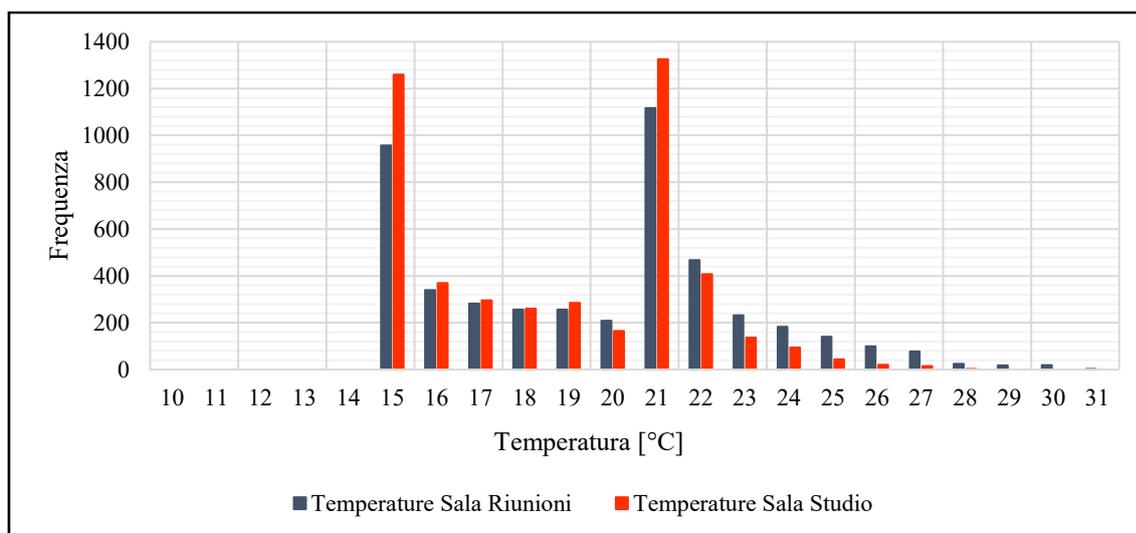


Figura 6.6: Distribuzione temperature nel periodo di riscaldamento per la Sala Riunioni e la Sala Studio

Focalizzando l'analisi sull'andamento delle temperature nei giorni feriali dal 21 al 25 Gennaio – escludendo i giorni in cui il modulo è chiuso – si può notare come la temperatura di 21 °C sia quella prevalente (Figura 6.7).

Inoltre sono stati riportati gli andamenti delle temperature interne dei locali e della temperatura esterna, in Figura 6.8. Si può osservare, come menzionato sopra, come esse dipendano fortemente dalle condizioni climatiche esterne. Il 21 Febbraio, caratterizzato da temperature esterne molto rigide, le due temperature interne seguono rigorosamente i set-point di temperatura. Per il 24 Febbraio, invece, le temperature esterne sono più alte, determinando minori dispersioni e una temperatura interna più alta, come nel caso della Sala Riunioni, pari a circa 24 °C.

Infine, in Figura 6.9, è riportato l'andamento dei carichi termici di riscaldamento, nel periodo considerato.

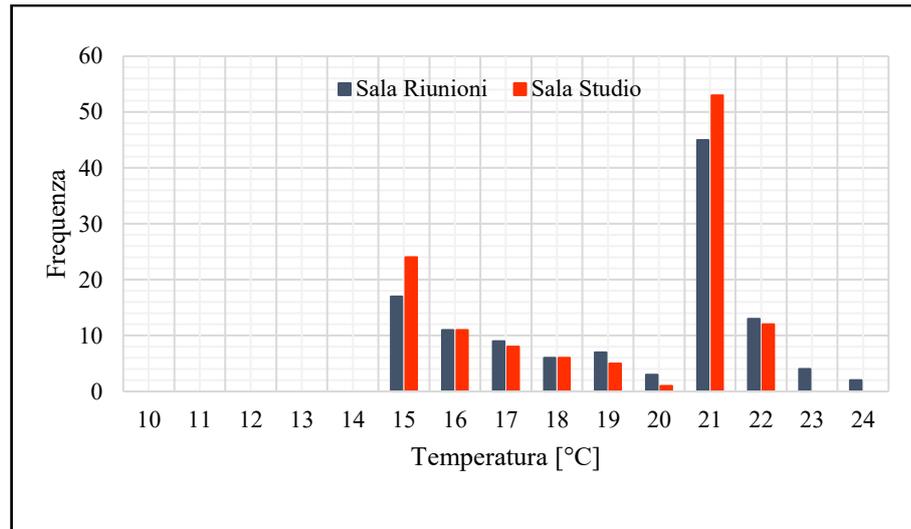


Figura 6.7: Distribuzione temperature Sala Riunioni e Sala Studio dal 21 al 25 Febbraio

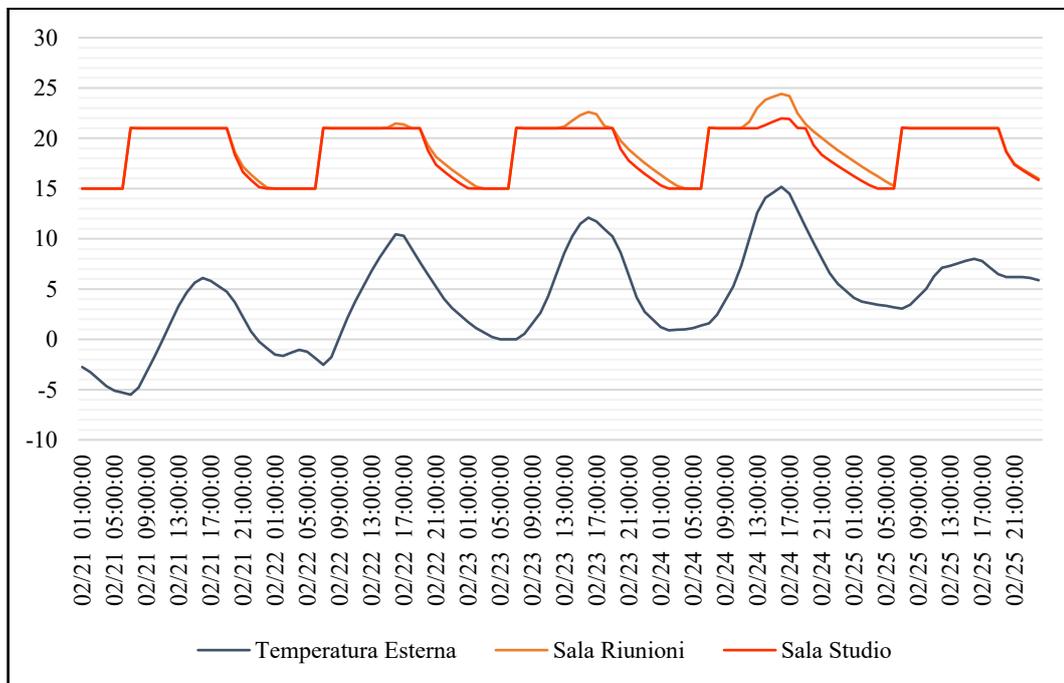


Figura 6.8: Andamento delle temperature interne della Sala Studio e Riunioni dal 21 al 25 Febbraio

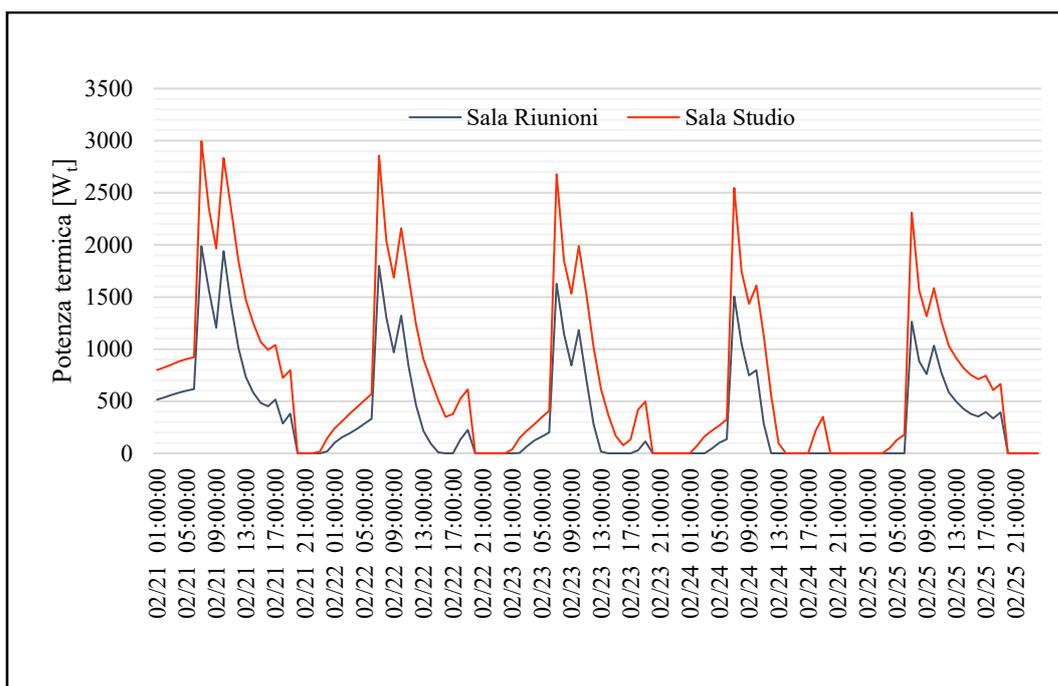


Figura 6.9: Andamento dei carichi termici della Sala Studio e Riunioni dal 21 al 25 Febbraio

Nelle seguenti Figure è mostrata la distribuzione delle temperature dal 1 Maggio al 31 Luglio e dal 1 Settembre al 30 Settembre, ad esclusione del mese di Agosto, in cui il modulo non risulta climatizzato. Come si può notare, la temperatura prevalente è di 26 °C, come visibile in Figura 6.10. Anche quando il set-point impostato è di 30 °C la temperatura dell'ambiente interno si attesta sempre intorno a tale valore, come visibile anche nel caso settimanale considerato, che va dal 25 al 29 Luglio, in Figura 6.11 e Figura 6.12.

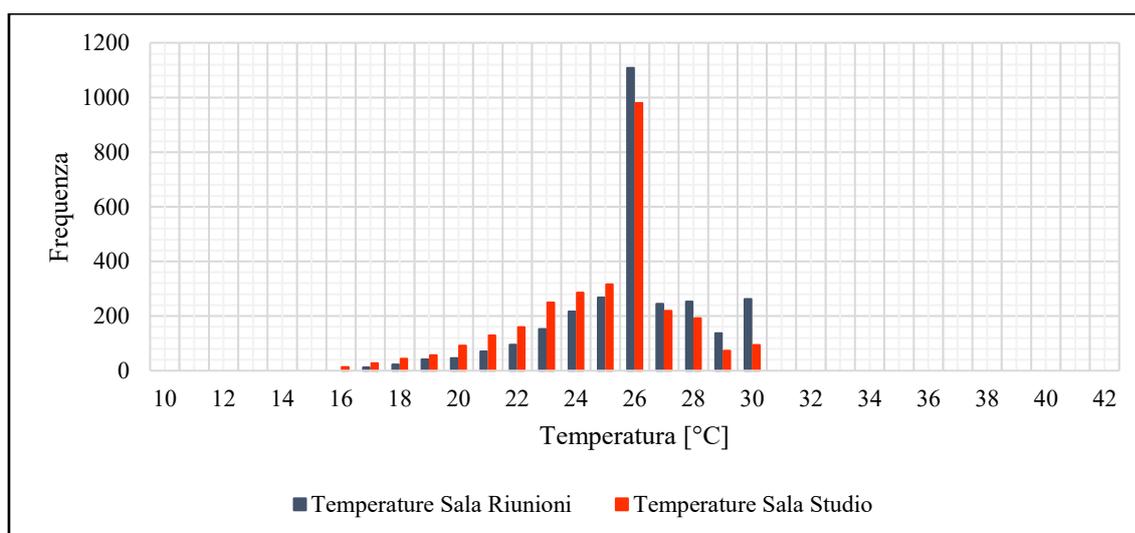


Figura 6.10: Distribuzione temperature nel periodo di raffrescamento per la Sala Riunioni e la Sala Studio

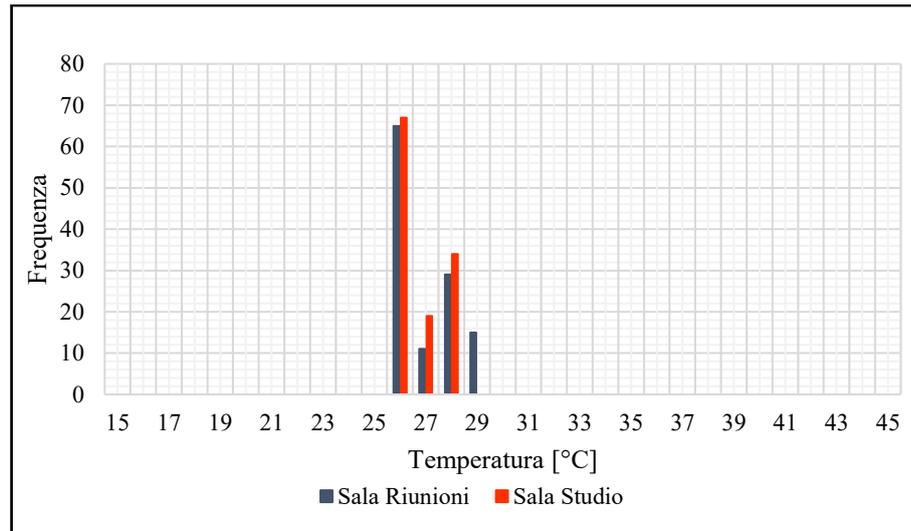


Figura 6.11: Distribuzione temperature Sala Riunioni e Sala Studio dal 25 al 29 Luglio

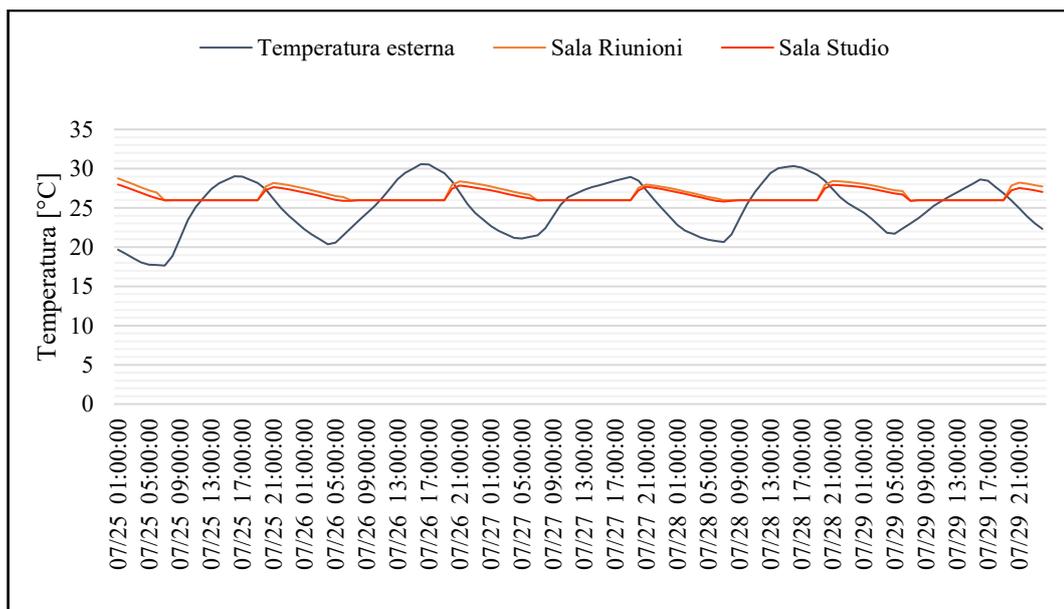


Figura 6.12: Andamento delle temperature interne della Sala Studio e Riunioni dal 25 al 29 Luglio

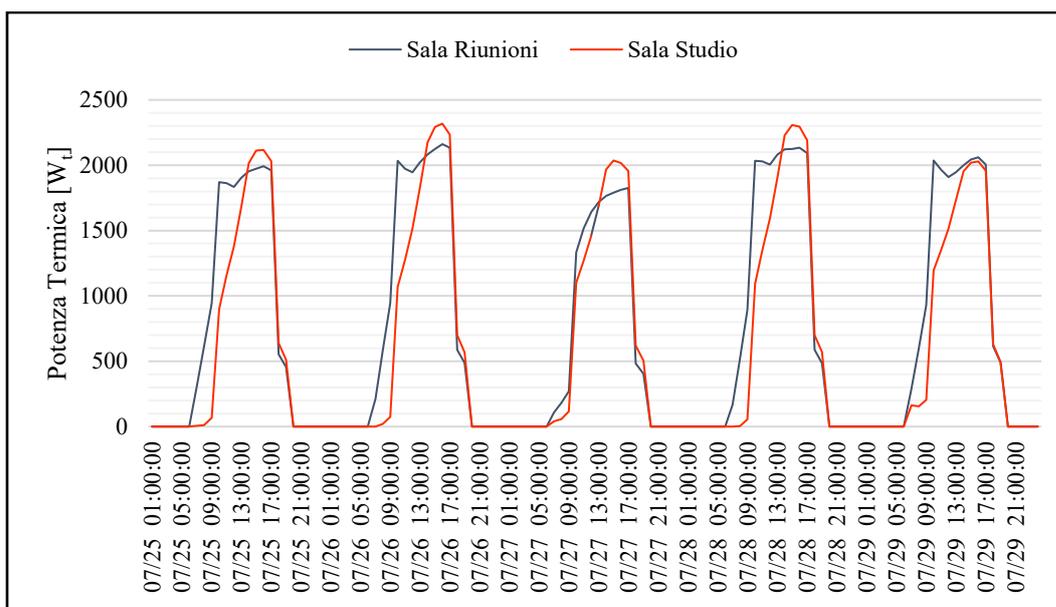


Figura 6.13: Andamento dei carichi termici della Sala Studio e Riunioni dal 25 al 29 Luglio – Caso 1

6.2.2 Caso 2

6.2.2.1 Caso 2 allineato

Successivamente, è stato considerato il Caso 2 allineato come oggetto di analisi. Per tale configurazione si sono stimati i consumi termici ed elettrici per riscaldamento e raffrescamento, relativamente alla Sala Studio e Sala Riunioni, utili per poi valutare l'accoppiamento dei carichi elettrici con la produzione fotovoltaica, nel Paragrafo 5.9. Nella Tabella 6.8 di seguito, è possibile visualizzare i consumi termici ed elettrici annui, associati al riscaldamento e raffrescamento, per entrambi gli ambienti.

Tabella 6.8: Fabbisogni termici e consumi elettrici per riscaldamento e raffrescamento per Sala Riunioni e Sala Studio – Caso 2 allineato

	Sala Riunioni		Sala Studio	
	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo
Consumo termico annuo [kWh/a]	1098	433	2346	328
Consumo termico annuo per m² [kWh/a m²]	47	18	55	8
Consumo elettrico annuo [kWh _e /a]	366	124	782	94
Consumo elettrico annuo per m² [kWh_e/a m²]	16	5	18	2

Si può osservare come, rispetto al Caso Studio 1, il fabbisogno termico invernale ed estivo della Sala Riunioni sia diminuito, passando da 1256 kWh_t a 1098 kWh_t per il caso invernale, e da 794 kWh_f a 433 kWh_f per il caso estivo. Questo è dovuto alla riduzione delle ore di apertura dell'ambiente, passate da otto ore a tre. Si è ipotizzato un funzionamento della Sala Riunioni sia mattiniero sia pomeridiano, dalle 9:00 alle 12:00 o dalle 14:00 alle 17:00, a giorni alterni. Se infatti prima si manteneva una temperatura di set-point, pari a 21°C nel caso invernale e a 26°C nel caso estivo, per circa 13 ore al giorno - essendo la Sala Riunioni aperta dalle 9:00 alle 17:00 - adesso lo si fa solo per nove ore al giorno (per maggiori dettagli si faccia riferimento al Paragrafo 5.5.2).

Per la Sala Studio invece, le ore di funzionamento sono rimaste invariate rispetto al Caso studio 1, mentre la frequenza di occupazione è diminuita, passando da 8 persone a 4. In questo caso i carichi termici invernali sono aumentati di una quantità poco significativa, passando da 2342 a 2346 kWh_t annui. Il piccolo aumento si verifica perché, con un minore numero di persone e un minore utilizzo delle postazioni elettriche, si hanno minori apporti gratuiti, che contribuiscono al riscaldamento dell'ambiente. Nel periodo di raffrescamento invece, la situazione si ribalta: essendoci minori apporti gratuiti, l'ambiente ha bisogno di un minore fabbisogno termico per raffrescamento. La richiesta energetica per il raffrescamento passa infatti da 537 kWh_f annui a 328 kWh_f annui.

Per quanto riguarda le differenze tra i fabbisogni termici dei due locali, valgono le stesse considerazioni fatte per il caso precedente.

I consumi elettrici per ventilazione meccanica, sono invece pari a 51 kWh_e/anno per Sala Riunioni e 67 kWh_e/anno per la Sala Studio. La riduzione di tali valori rispetto al caso precedente è dovuta alla stretta dipendenza dal numero di persone presenti in ciascun ambiente ora per ora. La Sala Riunioni possiede infatti 8 persone per tre ore al giorno mentre la Sala Studio 4 persone per otto ore al giorno.

I consumi elettrici per ventilazione meccanica sono riportati nella Tabella 6.9.

Tabella 6.9: Consumi elettrici per ventilazione meccanica – Caso 2 allineato

	Sala Riunioni	Sala Studio
Consumo elettrico annuale per ventilazione meccanica [kWh_e/a]	51	67

In Figura 6.14 e Figura 6.15 sono riportati gli andamenti annuali dei carichi termici per riscaldamento e raffrescamento, relativamente ai due ambienti.

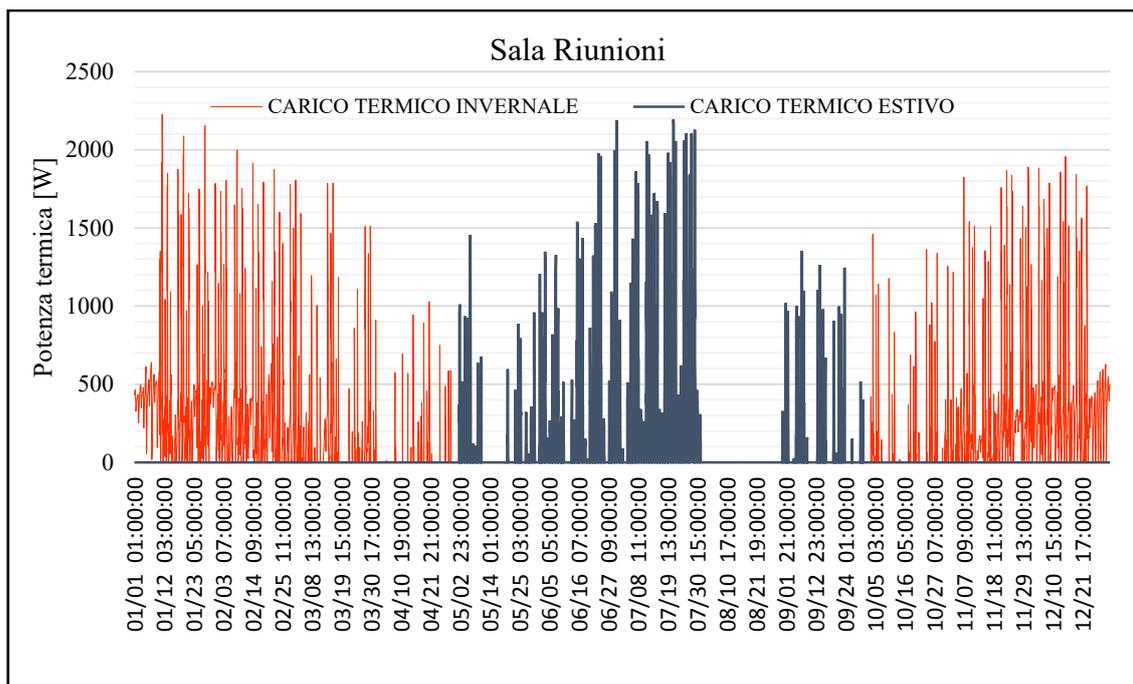


Figura 6.14: Carichi termici invernali ed estivi della Sala Riunioni – Caso 2

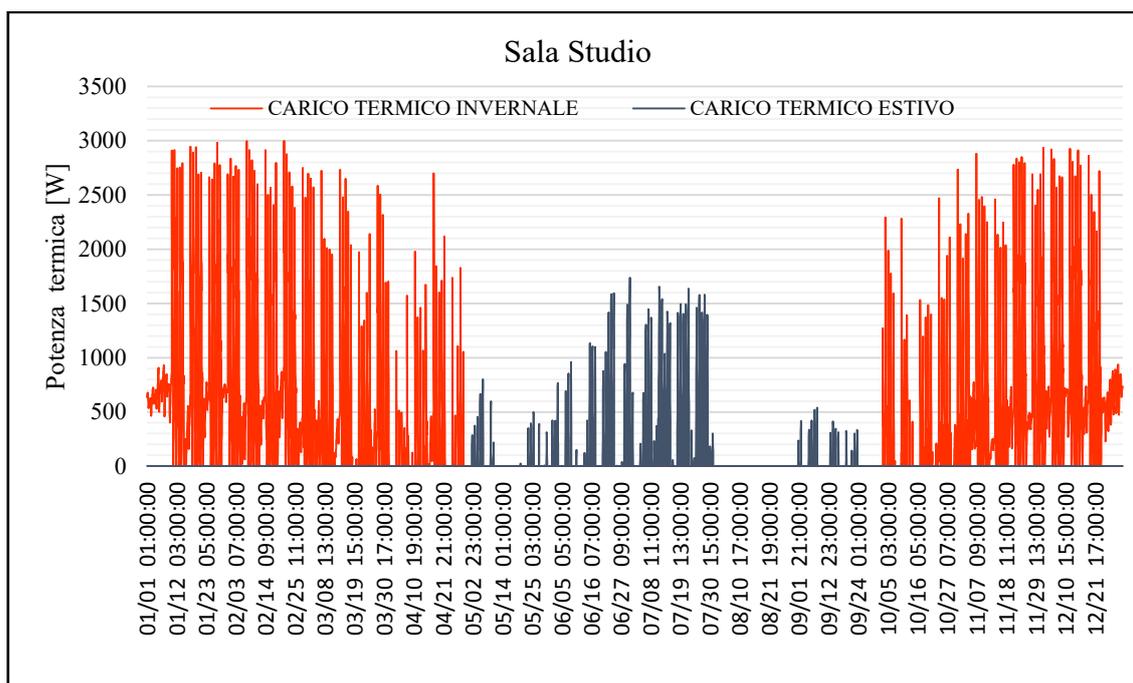


Figura 6.15: Carichi termici invernali ed estivi della Sala Studio – Caso 2

Nella Tabella 6.10 sono invece riportati i carichi termici ed elettrici mensili. Per quanto riguarda il periodo di riscaldamento, i mesi che richiedono una maggiore energia termica sono Gennaio, Febbraio, Novembre e Dicembre. In particolar modo Gennaio e Dicembre sono i mesi più critici, con una richiesta rispettivamente di 291 e 279 kWh termici annuali per la Sala Riunioni e 546 e 525 kWh termici annuali per la Sala

Studio. Per quanto riguarda il periodo di raffrescamento, per entrambi gli ambienti, i mesi di Giugno e Luglio sono quelli con un fabbisogno termico più alto, pari a 123 e 213 kWh termici per Sala Riunioni e 99 e 190 kWh termici per Sala Studio.

Tabella 6.10: Fabbisogno di energia mensile e consumi elettrici [kWh] – Caso 2 allineato

		Sala Riunioni		Sala Studio	
	Mese	Consumi termici [kWh]	Consumi elettrici [kWh _e]	Consumi termici [kWh]	Consumi elettrici [kWh _e]
Stagione di riscaldamento	Gennaio	291	97	546	182
	Febbraio	196	65	418	139
	Marzo	105	35	267	89
	Aprile	20	7	94	31
Stagione di raffrescamento	Maggio	43	12	20	6
	Giugno	123	35	99	28
	Luglio	213	61	190	54
	Agosto	2	1	0	0
	Settembre	53	15	18	5
Stagione di riscaldamento	Ottobre	37	12	123	41
	Novembre	169	56	372	124
	Dicembre	279	93	525	175

In Figura 6.16 sono riportati invece gli andamenti dei fabbisogni termici mensili sia per riscaldamento che per raffrescamento, per entrambi gli ambienti. Si evidenzia così come la Sala Studio abbia la maggiore richiesta di energia nel periodo invernale, mentre la Sala Riunioni nel periodo estivo.

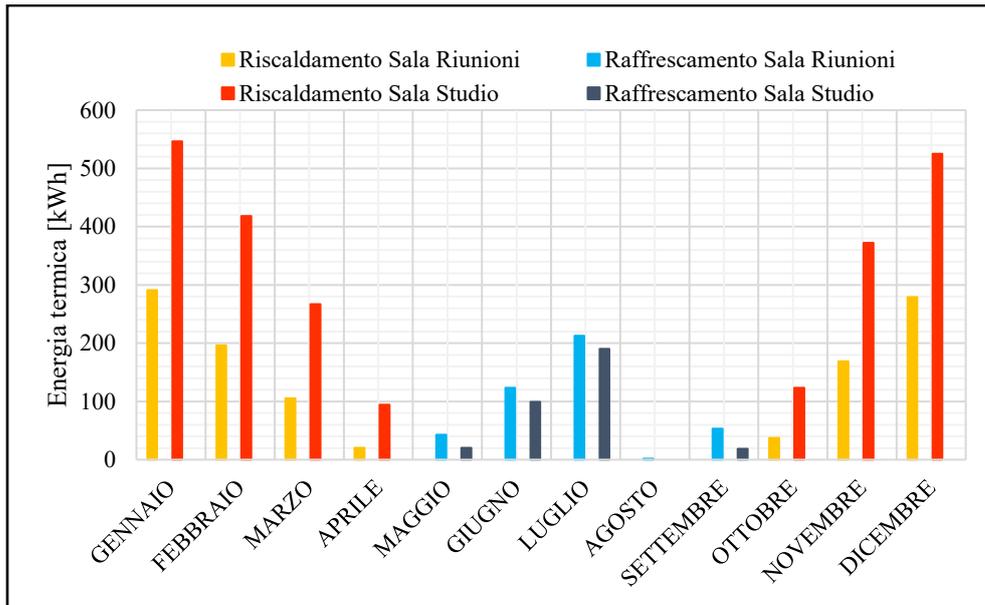


Figura 6.16: Fabbisogni termici mensili per riscaldamento e raffrescamento per Sala Studio e Sala Riunioni [kWh] – Caso 2 allineato

Si è poi deciso di analizzare un giorno di Gennaio e un giorno di Luglio, essendo per entrambi gli ambienti i mesi più significativi dal punto di vista dell'energia termica richiesta rispettivamente per riscaldamento e raffrescamento.

Per quanto riguarda il mese di Gennaio i picchi di potenza per riscaldamento della Sala Riunioni, superano i 2 kW_t, mentre per la Sala Studio si arriva anche a 3 kW_t. Le potenze termiche assorbite nella prima settimana del mese si mantengono basse per entrambi gli ambienti, a causa della chiusura del modulo abitativo per le vacanze natalizie (Figura 6.14 e Figura 6.15).

Si è scelto poi l'11 Gennaio per un'analisi più dettagliata dei consumi termici di ciascuno ambiente, in Figura 6.17. Il giorno in esame, registra un picco di potenza per la Sala Riunioni pari a 2,2 kW_t. Sempre in quel giorno, per la Sala Studio, la potenza massima è di quasi 3 kW_t. Le temperature interne seguono i set-point di temperatura impostati, pari entrambi a 21°C.

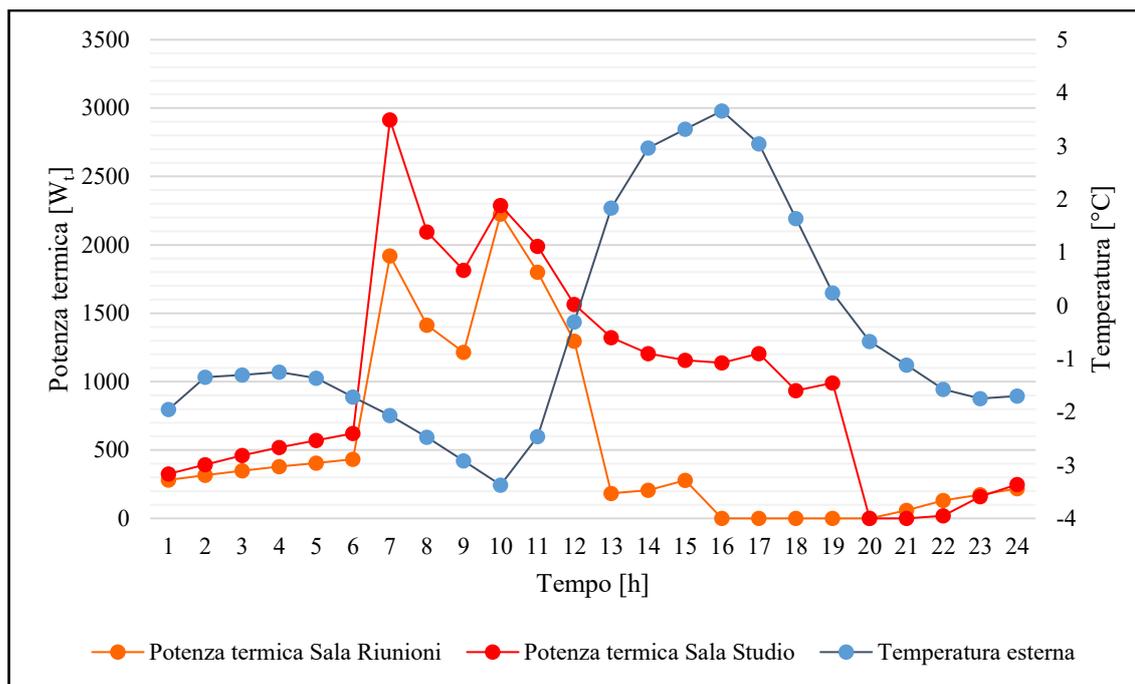


Figura 6.17: Consumi termici e andamento temperatura esterna per Sala Studio e Sala Riunioni – 11 Gennaio – Caso 2 allineato

Per quanto riguarda il mese di Luglio, i picchi di potenza di raffrescamento della Sala Riunioni sono attorno a 2 kW_f , mentre per la Sala Studio attorno a $1,6 \text{ kW}_f$.

Considerando come per il caso invernale un giorno rappresentativo estivo, si è preso in esame il giorno 11 Luglio, in Figura 6.18. La potenza termica associata alla Sala studio, come esposto prima, è inferiore rispetto alla Sala Riunioni, la quale funziona secondo una configurazione nuovamente mattiniera. L'aumento delle potenze termiche si verifica in corrispondenza di un aumento della temperatura esterna dell'aria, orientativamente tra le 13 e le 18.

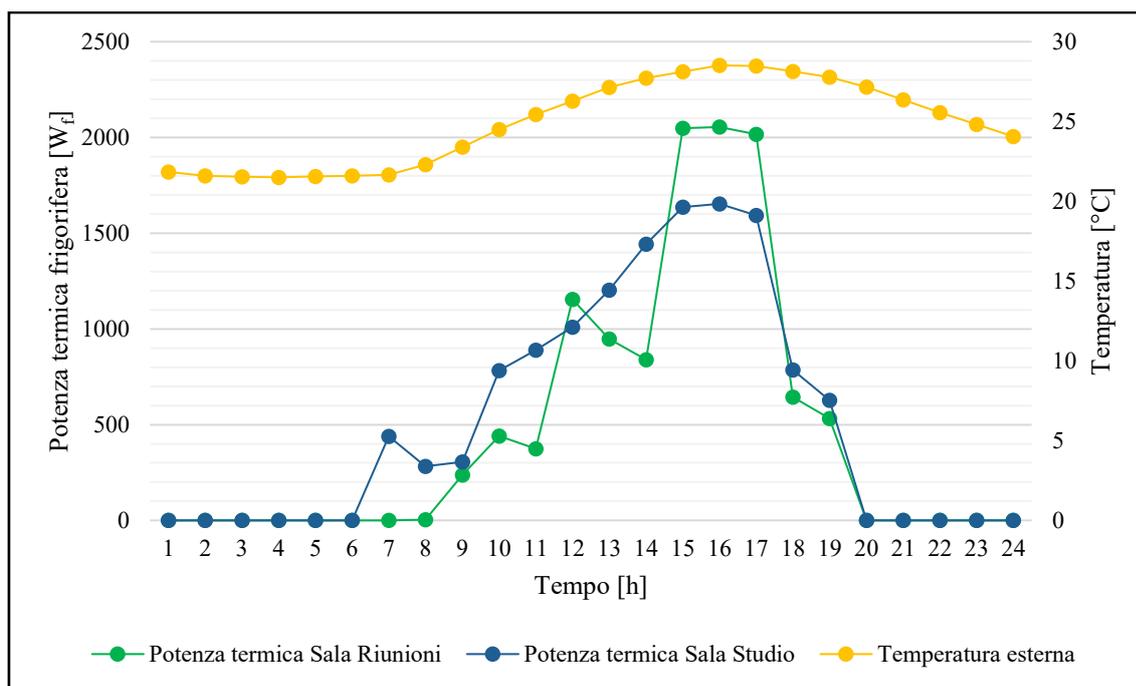


Figura 6.18: Consumi termici e andamento temperatura esterna per Sala Studio e Sala Riunioni – 11 Luglio – Caso 2 allineato

Relativamente al Caso 2, è stato di interesse analizzare altre due varianti rispetto al Caso 2 allineato. Le modifiche non riguardano le condizioni di funzionamento del modulo - che rimangono invariate – bensì la presenza o meno degli ostacoli circostanti e l’orientamento del modulo.

La prima variante studiata è relativa al caso senza gli ostacoli e rappresenta una configurazione ideale. Risulta di interesse confrontare e valutare in che modo gli ostacoli influenzano i consumi termici ed elettrici dei due ambienti.

La seconda variante è invece relativa al modulo ruotato in senso antiorario di -45°C rispetto al caso iniziale, con ciascun lato allineato secondo i punti cardinali.

6.2.2.2 Caso 2 senza ostacoli

Considerando dapprima il caso senza ombreggiamento, con modulo orientato allo stesso modo rispetto al Caso 2 allineato, in Tabella 6.12 sono riportati i consumi termici ed elettrici annui per Sala Studio e Sala Riunioni.

Si può notare come a causa dell’assenza degli ostacoli, rispetto al Caso 2 allineato, i consumi termici e dunque elettrici per riscaldamento siano diminuiti, passando da 1098 kWh_t a 891 kWh_t annui per la Sala Riunioni e da 2346 a 1511 kWh_t annui per la Sala Studio. Questo forte discostamento rispetto ai consumi precedenti dipende dunque dagli apporti di calore solari, maggiori in quest’ultimo caso, e che contribuiscono a diminuire la quota di energia termica necessaria per il riscaldamento di ciascun ambiente. Per quanto riguarda la stagione di raffrescamento invece, rispetto al Caso 2 allineato, per la Sala

Riunioni si passa da 433 kWh_f a 591 kWh_f annui e da 328 a 1235 kWh_f annui per la Sala studio. In questo caso gli apporti di calore solari contribuiscono a un aumento dell'energia necessaria per il raffrescamento che, in particolare per la Sala Studio, risulta più del doppio.

Tabella 6.11: Consumi termici ed elettrici annui della PdC per Sala Riunioni e Sala Studio – Caso 2 senza ostacoli

	Sala Riunioni		Sala Studio	
	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo
Consumo termico annuo [kWh/a]	891	591	1511	1235
Consumo termico annuo per m² [kWh/a m²]	38	25	35	29
Consumo elettrico annuo [kWh _e /a]	297	169	504	353
Consumo elettrico annuo per m² [kWh_e/a m²]	13	7	12	8

Nella seguente tabella è invece possibile osservare i consumi termici ed elettrici mensili per Sala riunioni e Sala studio.

Tabella 6.12: Consumi termici ed elettrici mensili della PdC per Sala riunioni e Sala Studio

	Mese	Sala Riunioni		Sala Studio	
		Consumi termici [kWh]	Consumi elettrici [kWh _e]	Consumi termici [kWh]	Consumi elettrici [kWh _e]
Stagione di riscaldamento	Gennaio	250	83	403	134
	Febbraio	157	52	255	85
	Marzo	79	26	144	48
	Aprile	8	3	24	8
Stagione di raffrescamento	Maggio	73	21	202	58
	Giugno	165	47	330	94
	Luglio	265	76	512	146
	Agosto	5	1	13	4
	Settembre	84	24	180	51
Stagione di riscaldamento	Ottobre	22	7	52	17
	Novembre	135	45	239	80
	Dicembre	240	80	394	131

È interessante notare come i carichi termici variano rispetto ai giorni precedentemente analizzati del Caso 2 allineato, ossia 11 Gennaio e 11 Luglio.

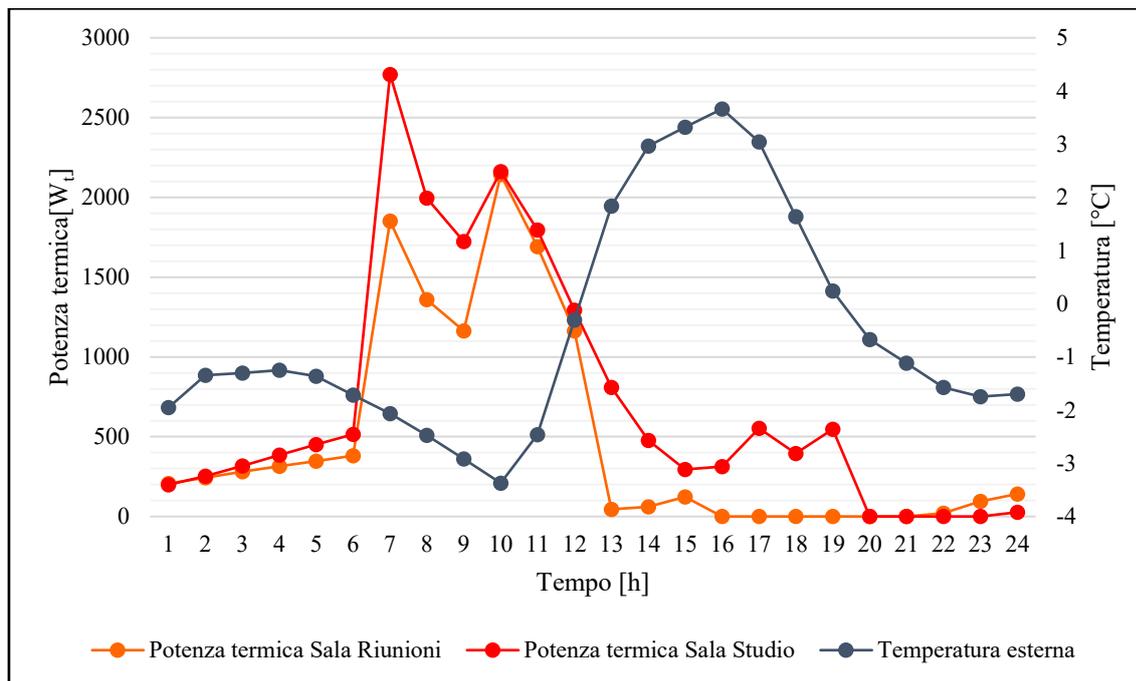


Figura 6.19: Consumi termici e andamento temperatura esterna per Sala Studio e Sala Riunioni – 11 Gennaio – Caso 2 senza ostacoli

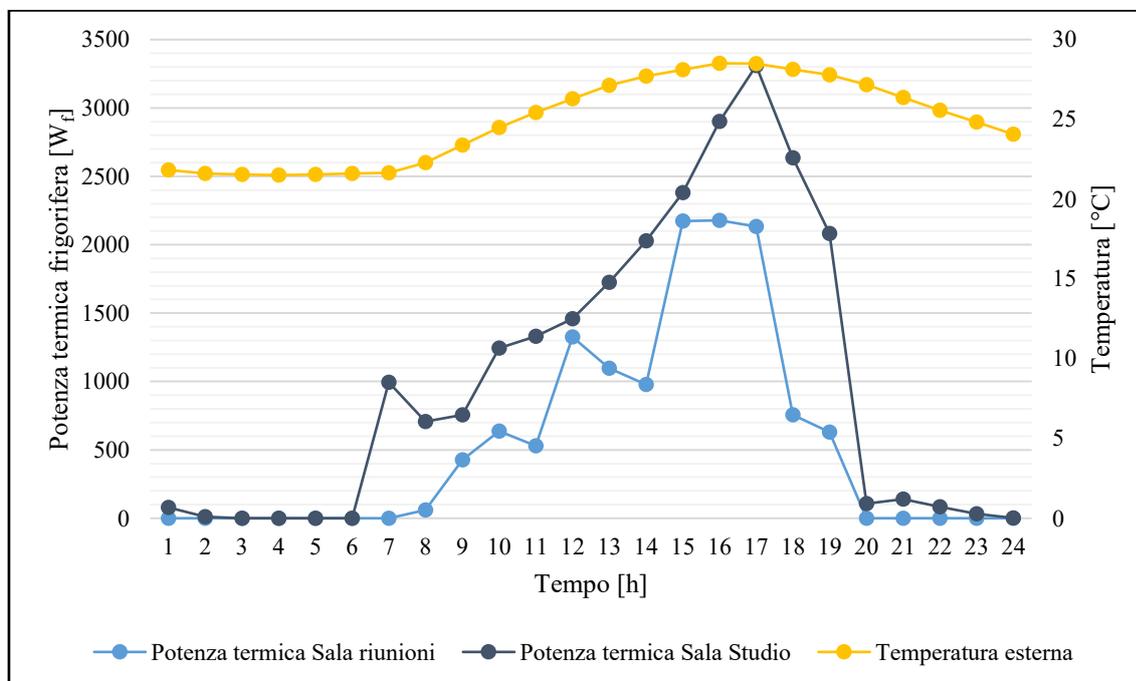


Figura 6.20: Consumi termici e andamento temperatura esterna per Sala Studio e Sala Riunioni – 11 Luglio – Caso 2 senza ostacoli

6.2.2.3 Caso 2 non allineato

Successivamente si è analizzato il caso con orientamento del modulo secondo le direzioni dei punti cardinali. I risultati dei consumi termici ed elettrici annuali sono riportati in Tabella 6.13.

Visualizzando i risultati ottenuti per la Sala Riunioni si può notare un aumento del fabbisogno termico per riscaldamento di circa 178 kWh_t annui rispetto al Caso 2 allineato. Questo è dovuto al fatto che, originariamente, le pareti esterne della Sala Riunioni erano orientate rispettivamente verso Sud-Ovest, Sud-Est e Nord-Est mentre nel nuovo assetto sono orientate verso Sud, Est e Ovest, perdendo quel contributo di radiazione fornito dall'orientamento delle due superfici verso Sud. I minori apporti solari hanno un'influenza sul fabbisogno termico per raffrescamento, il quale diminuisce. Il fabbisogno termico estivo, passa dunque da 433 kWh_f annui a 309 kWh_f annui.

Il nuovo orientamento della Sala Studio, invece, determina un aumento degli apporti di calore solari e dunque una riduzione del fabbisogno termico invernale, il quale passa, rispetto al Caso 2 allineato, da 2346 kWh_t/anno a 2074 kWh_t/anno. Questo orientamento risulta tuttavia sfavorevole d'estate in quanto determina un aumento del fabbisogno per raffrescamento di circa 100 kWh_f annuali.

Tabella 6.13: Consumi termici ed elettrici annui della PdC per Sala Riunioni e Sala Studio - Caso non allineato

	Sala Riunioni		Sala Studio	
	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo
Consumo termico annuo [kWh/a]	1276	309	2074	434
Consumo termico annuo per m² [kWh/a m²]	54	13	48	10
Consumo elettrico annuo [kWh_e/a]	425	88	691	124
Consumo elettrico annuo per m² [kWh_e/a m²]	18	4	16	3

Tabella 6.14: Consumi termici ed elettrici mensili Sala Riunioni e Sala Studio – Caso non allineato

	Mese	Sala Riunioni		Sala Studio	
		Carichi termici [kWhth]	Carichi elettrici [kWh]	Carichi termici [kWhth]	Carichi Elettrici [kWh]
Stagione di riscaldamento	GENNAIO	329	110	492	164
	FEBBRAIO	230	77	365	122
	MARZO	124	41	232	77
	APRILE	28	9	81	27
Stagione di raffrescamento	MAGGIO	25	7	39	11
	GIUGNO	87	25	112	32
	LUGLIO	163	46	229	65
	AGOSTO	0	0	1	0
	SETTEMBRE	34	10	52	15
Stagione di riscaldamento	OTTOBRE	49	16	101	34
	NOVEMBRE	202	67	324	108
	DICEMBRE	315	105	479	160

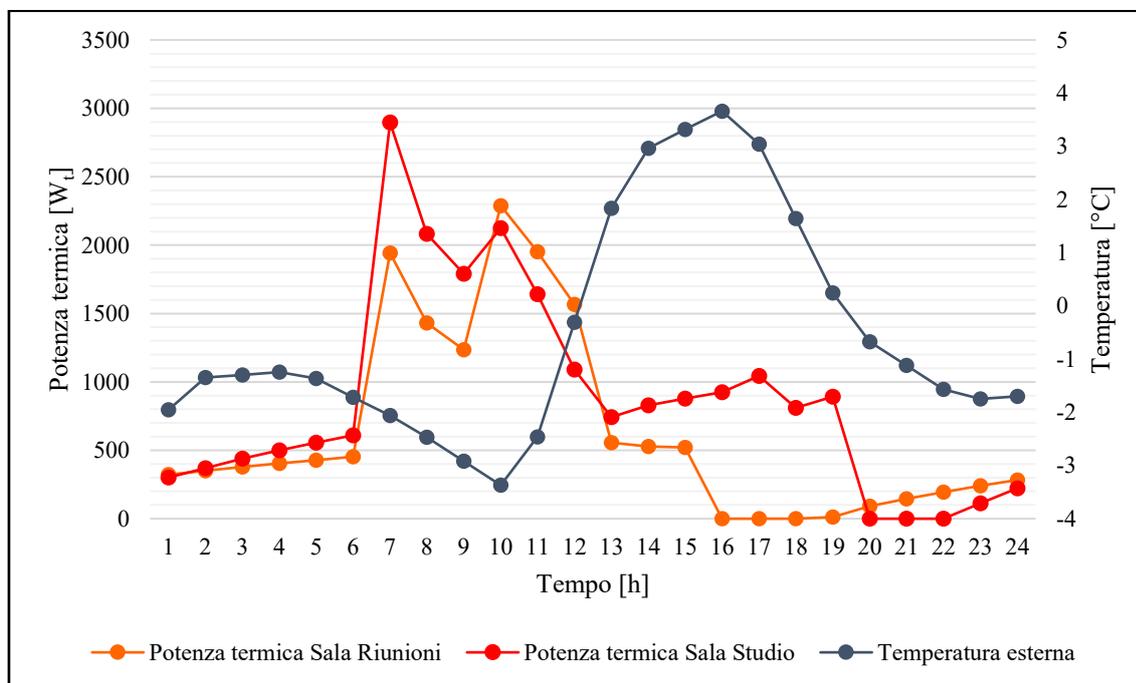


Figura 6.21: Consumi termici e andamento temperatura esterna per Sala Studio e Sala Riunioni – 11 Gennaio – Caso 2 non allineato

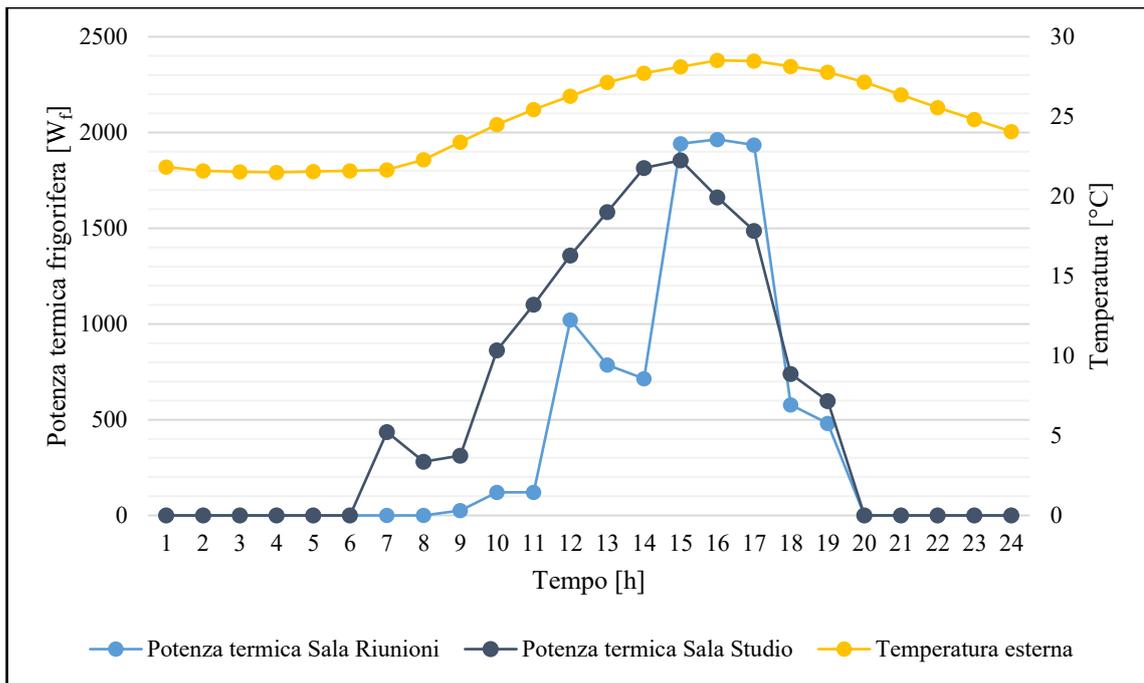


Figura 6.22: Consumi termici e andamento temperatura esterna per Sala Studio e Sala Riunioni – 11 Luglio – Caso 2 non allineato

6.2.3 Confronto tra le diverse configurazioni del Caso 2

In questo paragrafo si è effettuato un confronto tra le diverse configurazioni del caso studio 2.

Analizzando la situazione annuale, come visibile in Tabella 6.15 e in Tabella 6.16, il caso ideale, rappresentato dalla configurazione senza ostacoli, risulta quello più favorevole dal punto di vista dei consumi termici ed elettrici annuali della pompa di calore, avendo un consumo elettrico totale annuo di 1323 kWh/anno. Per il Caso 2 allineato il fabbisogno è invece di 1366 kWh mentre per il caso studio 2 con rotazione di -45° si è ottenuto un fabbisogno di 1329 kWh/anno.

Tabella 6.15: Fabbisogno termico invernale ed estivo [kWh] per Sala Riunioni e Sala Studio nelle diverse configurazioni del Caso 2

Fabbisogno termico [kWh/a]	Sala Riunioni		Sala Studio	
	Invernale	Estivo	Invernale	Estivo
Caso 2 allineato	1098	433	2346	328
Caso 2 senza ostacoli	891	591	1511	1235
Caso 2 non allineato	1276	309	2074	434

Tabella 6.16: Consumi elettrici annui [kWh] nelle varie configurazioni - Sala riunioni e Sala Studio

	Sala riunioni [kWh _e]	Sala studio [kWh _e]	Totale [kWh _e]
Caso 2 allineato	490	876	1366
Caso 2 senza ostacoli	466	857	1323
Caso 2 non allineato	514	815	1329

Nello specifico, per quanto riguarda i carichi termici mensili, e dunque elettrici, della Sala Riunioni, si è osservato che nei mesi da Gennaio ad Aprile la configurazione senza ostacoli presenta il fabbisogno termico più basso, seguita dal Caso 2 allineato e dalla configurazione con il modulo abitativo ruotato. Questo è motivato dagli apporti solari gratuiti, maggiori per la configurazione senza ostacoli e che diminuiscono ruotando il modulo di -45° rispetto al Caso studio 2. Nei mesi da Maggio a Settembre il caso senza ostacoli presenta il maggior fabbisogno termico per raffrescamento. Tra il caso allineato

e non allineato, il primo ha i maggiori consumi per raffrescamento, avendo degli apporti solari più alti. Il confronto tra le varie situazioni è visibile in Figura 6.23

Per la Sala studio, le differenze tra il caso allineato e il caso non allineato seguono una logica inversa rispetto a quella della Sala riunioni. L'ambiente passa infatti da un'esposizione delle facciate verso Nord-ovest, Nord-est e Sud-ovest a un'esposizione dei lati verso Nord, Sud e Ovest. Questo determina un aumento della quantità di apporti di calore gratuiti provenienti dalla radiazione solare. Per il caso 2 senza ostacoli della Sala Studio valgono le medesime considerazioni fatte per la Sala riunioni. Il confronto è visibile in Figura 6.24.

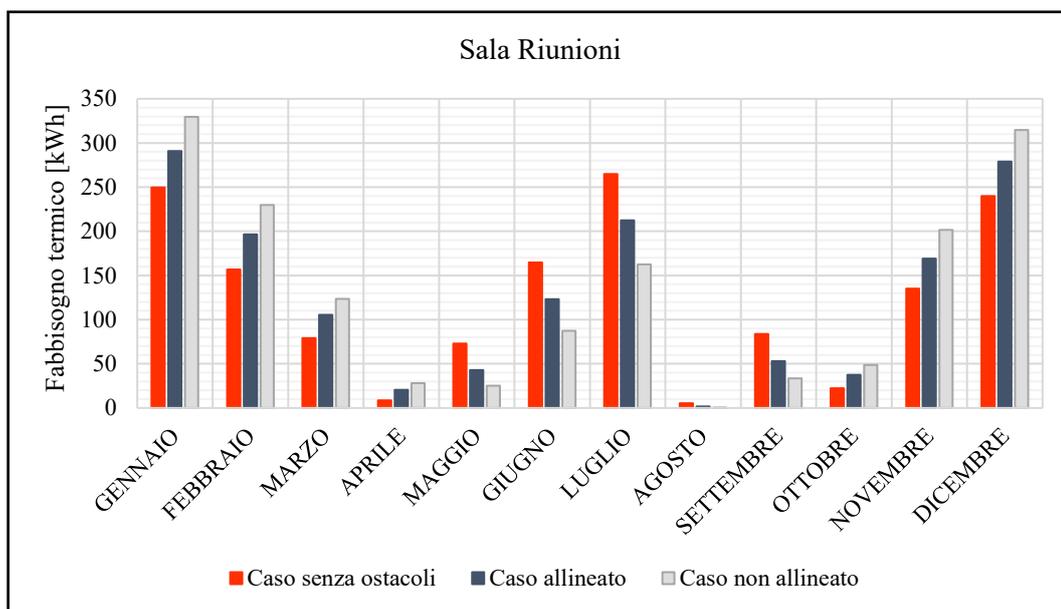


Figura 6.23: Confronto dei fabbisogni termici nelle varie configurazioni del Caso 2 – Sala Riunioni

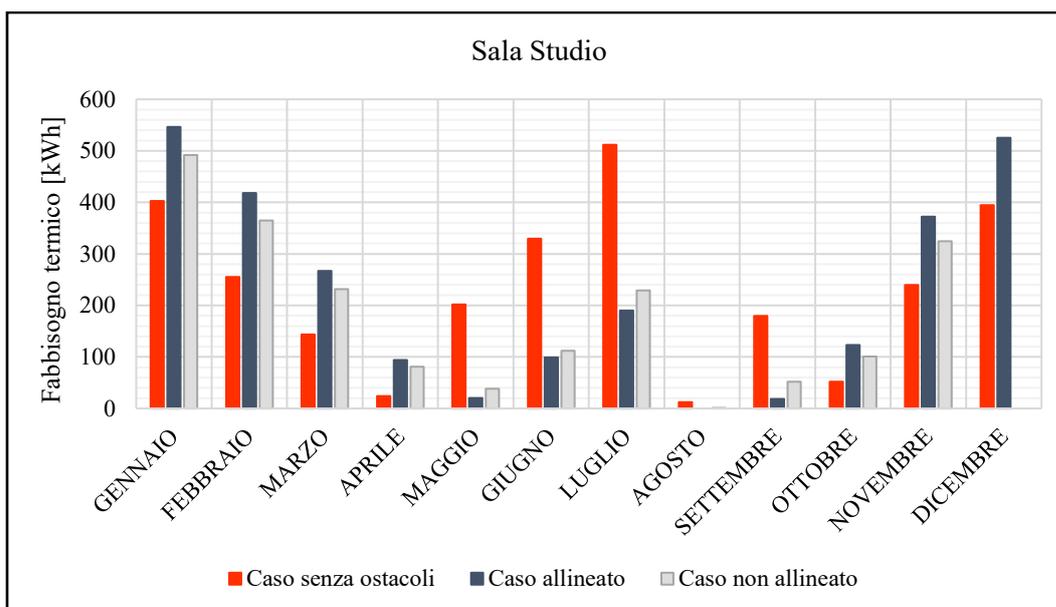


Figura 6.24: Confronto dei fabbisogni termici nelle varie configurazioni del Caso 2 – Sala studio

Si può arrivare alla conclusione che i consumi dei casi con ostacoli risultano pressoché paragonabili e che dunque, in questo caso, l'orientamento originario dell'edificio non penalizza, rispetto alla nuova configurazione, i consumi elettrici associati al riscaldamento e raffrescamento. Inoltre, come già evidenziato precedentemente, un orientamento verso Sud-Est rimane coerente con l'orientamento degli edifici circostanti.

6.3 Analisi dei consumi elettrici e della generazione fotovoltaica

In riferimento al Caso Studio 2, per tutti i tre sottocasi si sono valutati la produzione fotovoltaica, i consumi elettrici e le quote di autoconsumo e autoproduzione mensili e annuali per entrambi i locali. Si è poi proseguito con un confronto, per ciascun ambiente, tra i differenti casi. La trattazione non è stata eseguita per il Caso 1 in quanto, essendo in questo caso i consumi elettrici notevoli, si è deciso di analizzare solamente una situazione di utilizzo più realistico del modulo abitativo, verificando che quantità come l'autoconsumo e l'autosufficienza avessero valori accettabili.

Questo caso considera l'effetto degli ostacoli sui carichi elettrici totali e sulla produzione fotovoltaica, con orientamento dell'edificio concorde con quello degli edifici circostanti. Di seguito si è eseguita, per maggiore chiarezza e precisione, una trattazione separata rispettivamente per la Sala Riunioni e la Sala Studio.

6.3.1 Caso 2 allineato

6.3.1.1 Sala Riunioni

Per quanto riguarda i consumi elettrici annuali, mostrati in Figura 6.25, la Sala Riunioni presenta un fabbisogno totale elettrico annuo pari a 1104 kWh e una produzione fotovoltaica di 2396 kWh annui. Le quote di consumo che influiscono maggiormente sul fabbisogno elettrico annuale sono quelle relative al riscaldamento e raffrescamento del modulo abitativo, pari a circa 490 kWh annuali, seguite dai consumi elettrici delle postazioni per i PC e forza motrice, pari a 436 kWh annuali, dal sistema di illuminazione LED, con 77 kWh annui, dal proiettore e dal consumo elettrico per ventilazione meccanica, entrambi pari a 51 kWh annui.

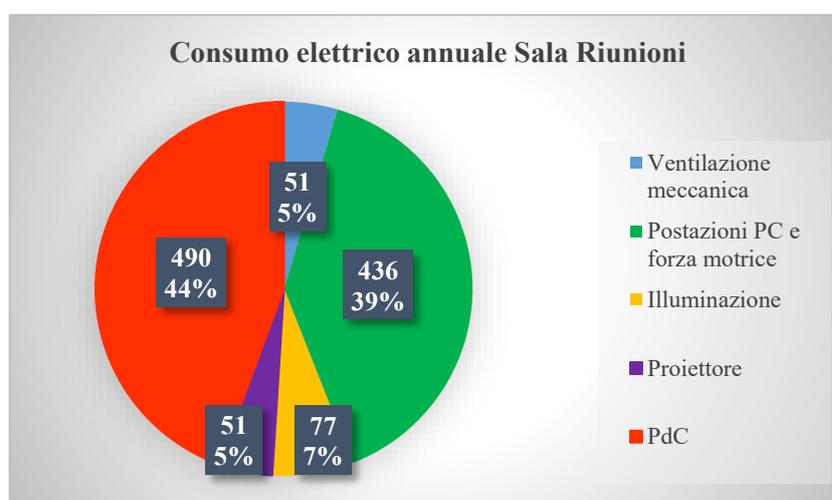


Figura 6.25: Quote di Consumo Elettrico Annuale [kWh] - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Per valutare l'accoppiamento tra produzione fotovoltaica e carichi elettrici e vedere più nel dettaglio il significato dei concetti di autoproduzione e autoconsumo, sono stati presi in considerazione i mesi più significativi per ogni stagione, ossia Gennaio, Aprile, Luglio e Novembre. Per ciascun mese, si è selezionato il giorno con una maggiore produzione fotovoltaica – ossia un giorno con cielo sereno – e il giorno con una produzione fotovoltaica minore – ossia un giorno con cielo coperto. È possibile in questo modo portare degli esempi di autoconsumo e autoproduzione nell'arco di una giornata.

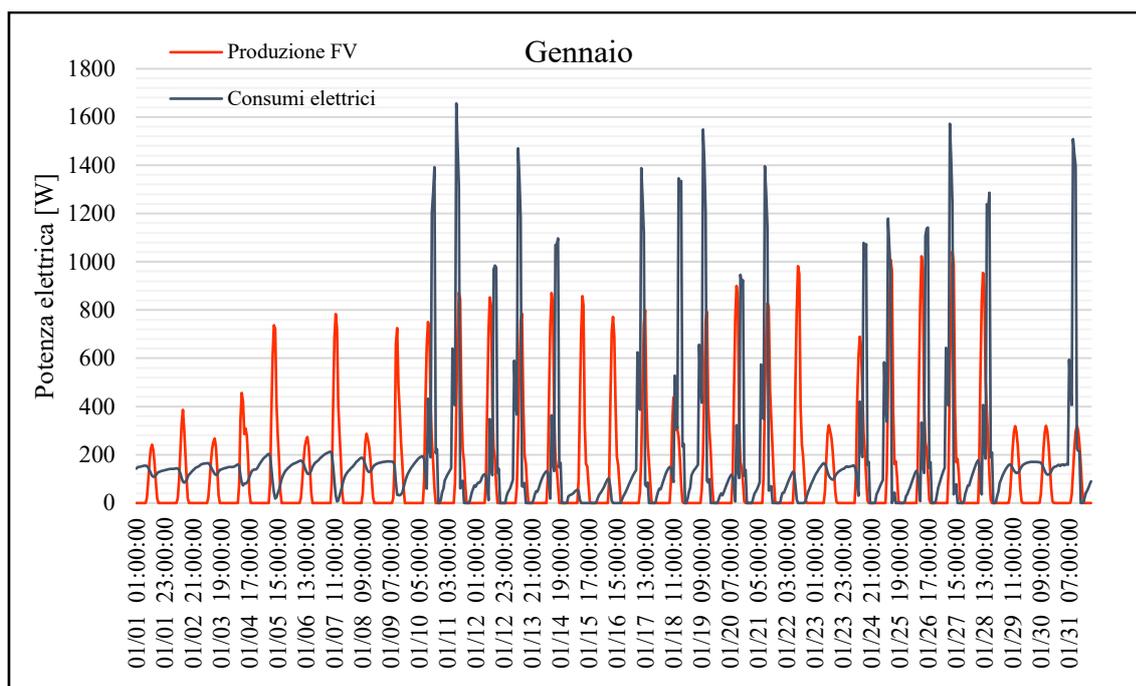


Figura 6.26: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Gennaio - Sala Riunioni -
Caso 2 allineato

Per il mese di Gennaio sono stati analizzati i giorni 27 Gennaio e 18 Gennaio, rispettivamente per cielo sereno e coperto.

In Figura 6.27 è mostrato un esempio che evidenzia l'andamento giornaliero dei consumi elettrici e della generazione fotovoltaica per il giorno 27 Gennaio. L'area sottesa dalla curva rossa rappresenta la quota di energia elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici. L'area sottesa dalla curva blu rappresenta invece la quota di energia elettrica richiesta dall'utenza. La porzione compresa tra la curva rossa e blu rappresenta il surplus di energia elettrica prodotta che non viene immediatamente consumata. Questa quota di energia viene utilizzata per caricare la batteria o, se quest'ultima risulta carica, viene immessa in rete. L'area invece compresa tra la curva blu e la curva rossa rappresenta l'energia elettrica richiesta dall'utenza e che i moduli fotovoltaici non riescono a coprire.

Il giorno 27 Gennaio è uno dei giorni più produttivi del mese, con una produzione fotovoltaica pari a circa 4,4 kWh e un consumo elettrico giornaliero pari a 7 kWh. In questo giorno la Sala Riunioni ha un funzionamento mattiniero. La curva di produzione e la curva di consumo risultano disaccoppiate e questo determina, nelle ore del mattino, che i consumi vengano coperti in parte dalla produzione e che nelle ore pomeridiane vi sia un surplus di energia elettrica prodotta. Dopo le ore 13:00 si verifica un eccesso di energia prodotta in quanto la Sala Riunioni è chiusa. La quota di autoconsumo giornaliera è del 62%. Pur essendo l'autoconsumo elevato, questa grandezza, non è tuttavia indicativa della quantità di energia elettrica richiesta coperta dal fotovoltaico in quanto fa riferimento alla sola quota di energia fotovoltaica che viene immediatamente sfruttata. In casi in cui la

produzione elettrica è esigua, a causa delle condizioni climatiche avverse, la quota di autoconsumo è elevata, essendo l'energia elettrica prodotta non sufficiente a coprire il consumo elettrico ma l'autosufficienza è bassa. In questo caso l'autoproduzione è del 40%.

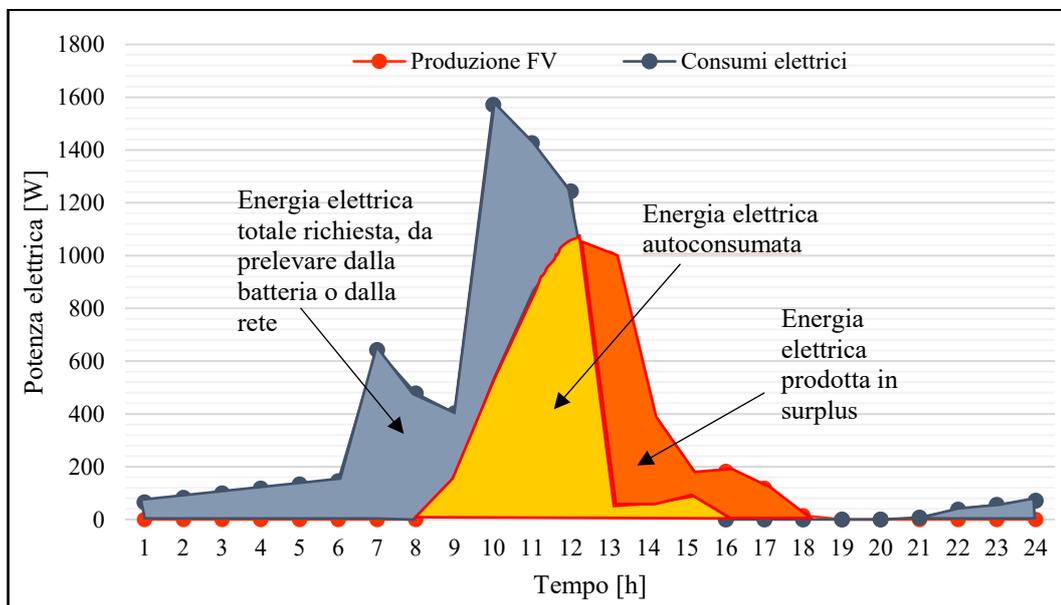


Figura 6.27: Quote di generazione, consumo e autoconsumo del 27 Gennaio - Sala Riunioni – Caso 2 allineato

I consumi elettrici presentano un tale andamento a causa della potenza richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento, funzionante per tutte le 24 ore anche quando l'ambiente risulta chiuso. In Figura 6.28 è possibile visualizzare come la PdC incide sul consumo elettrico totale.

È evidenziata l'energia elettrica richiesta dalla pompa di calore in oro (pari a circa 4 kWh) mentre in blu è evidenziata l'energia elettrica richiesta dall'illuminazione, postazioni per PC e forza motrice e proiettore, attivati solo quando l'ambiente entra in funzione.

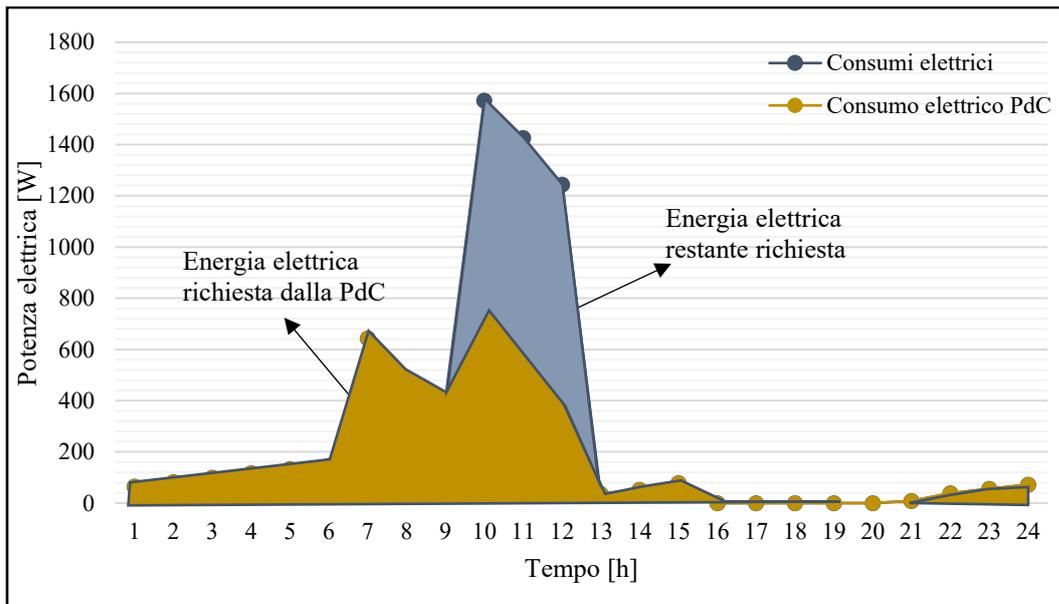


Figura 6.28: Quota di energia elettrica richiesta dalla PdC il 27 Gennaio - Sala Riunioni
 - Caso 2 allineato

Si è voluto poi analizzare il giorno 26 Gennaio per mostrare, nonostante la produzione elettrica maggiore, il forte disaccoppiamento tra produzione e consumi. Questo è dovuto a un funzionamento pomeridiano della Sala Riunioni e a una maggiore richiesta di energia elettrica dalle 15:00 alle 18:00, quando la produzione fotovoltaica risulta minore. In questo caso la quota di autoconsumo è dell'ordine del 32% mentre la quota di autosufficienza è dell'ordine del 27%.

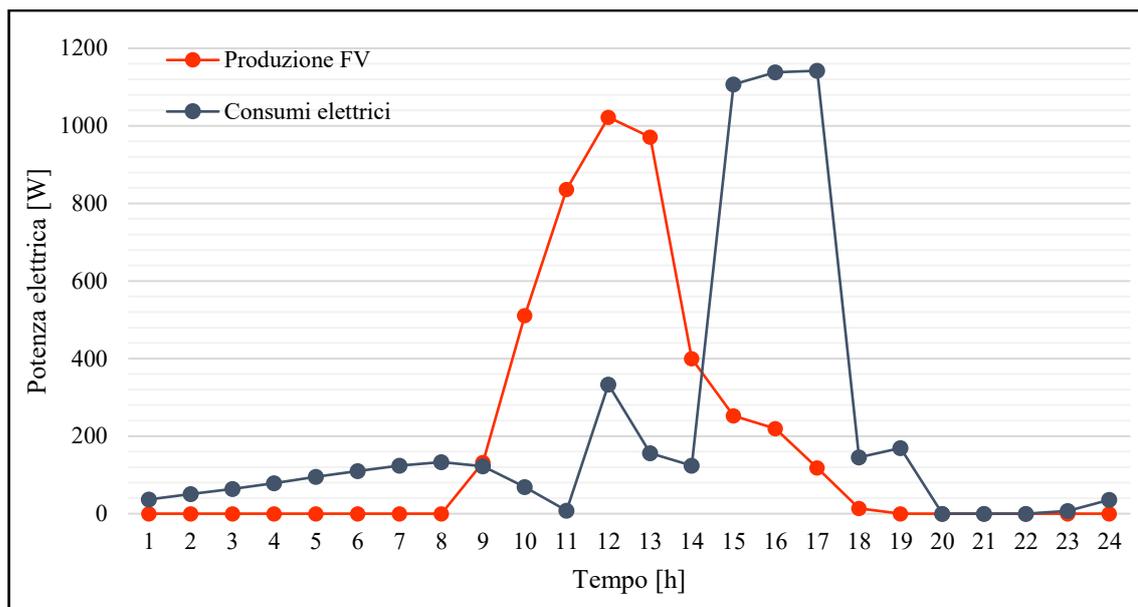


Figura 6.29: Analisi della generazione e dei consumi del 26 Gennaio - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Per quanto riguarda il 18 Gennaio, essendo un giorno con cielo coperto, la produzione fotovoltaica scende a 2,4 kWh mentre i consumi elettrici giornalieri sono sempre dell'ordine dei 7 kWh. La quota di autoconsumo sale a circa 77% mentre la quota di autosufficienza scende al 26%, essendo l'energia elettrica prodotta insufficiente per coprire i consumi elettrici giornalieri. Il giorno selezionato si riferisce a un funzionamento pomeridiano dell'ambiente.

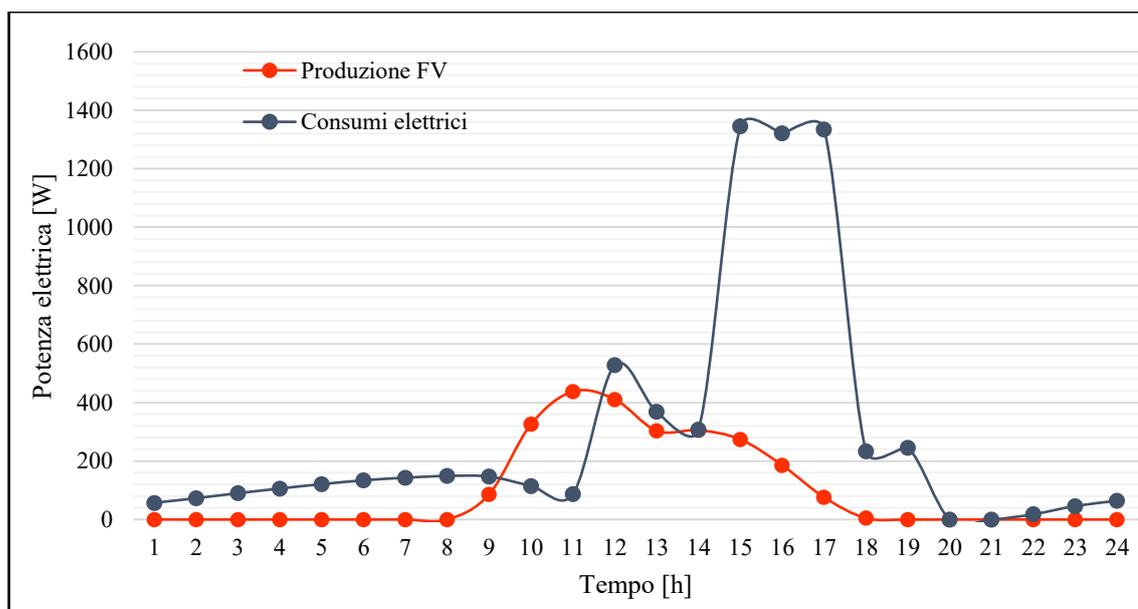


Figura 6.30: Analisi della generazione e dei consumi del 18 Gennaio - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Per il mese di Aprile sono stati selezionati i giorni 19 e 20 Aprile, a dimostrazione del fatto che giorni consecutivi possono avere comportamenti notevolmente differenti.

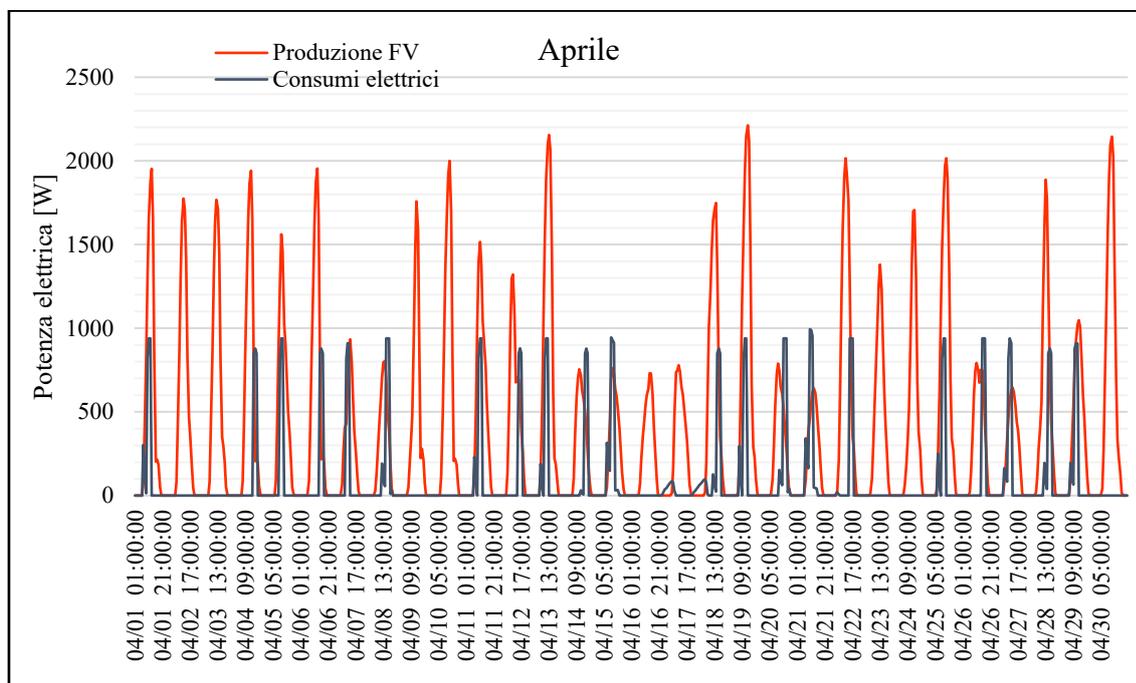


Figura 6.31: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Aprile - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Come si può notare, i due giorni analizzati mostrano un funzionamento sia mattiniero che pomeridiano della Sala Riunioni. I consumi elettrici per il giorno 19 Aprile sono pari a circa 3kWh mentre la produzione fotovoltaica è di circa 15 kWh. La quota di autoconsumo è pari al 20% mentre la quota di autoproduzione è pari al 96%. Per il giorno 20 Aprile, invece, l'autoconsumo è pari al 27% mentre l'autoproduzione scende al 50%, in quanto la produzione fotovoltaica è diminuita fino a 6 kWh. I consumi elettrici rimangono invece invariati e pari a circa 3kWh.

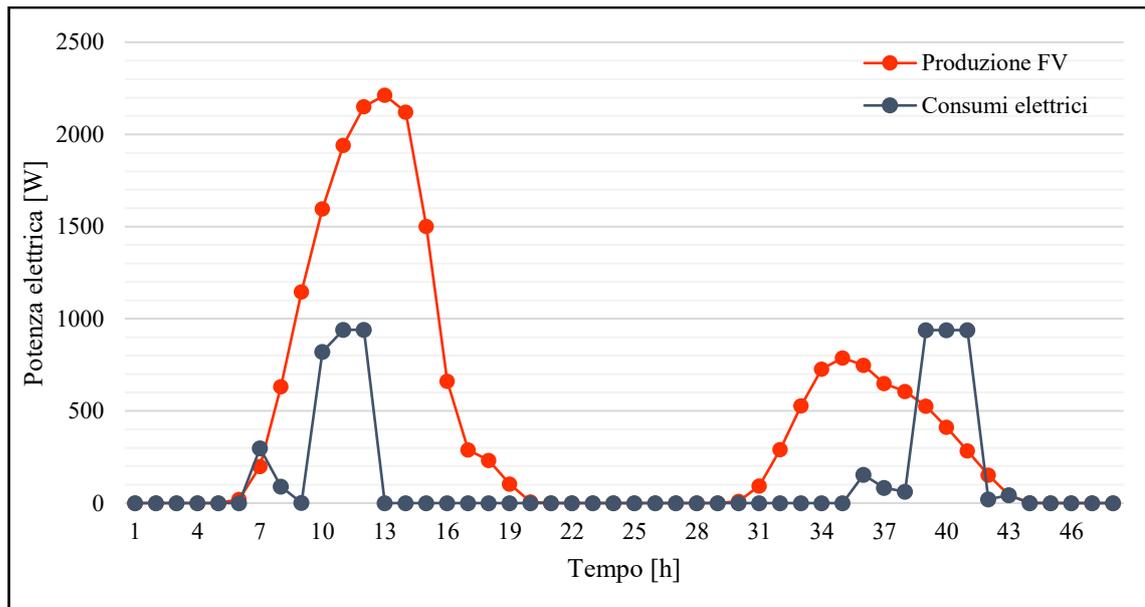


Figura 6.32: Analisi della generazione e dei consumi del 19 e 20 Aprile - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Per il mese di Luglio i giorni presi in considerazione sono il 4 Luglio e il 20 Luglio, che rappresentano rispettivamente un giorno di cielo coperto e un giorno di cielo sereno. Benché la produzione fotovoltaica mensile sia elevata, il cielo coperto determina un'autosufficienza del 60% e un autoconsumo del 33%. Per il 20 Luglio invece l'autoproduzione è del 100% mentre l'autoconsumo è del 33%.

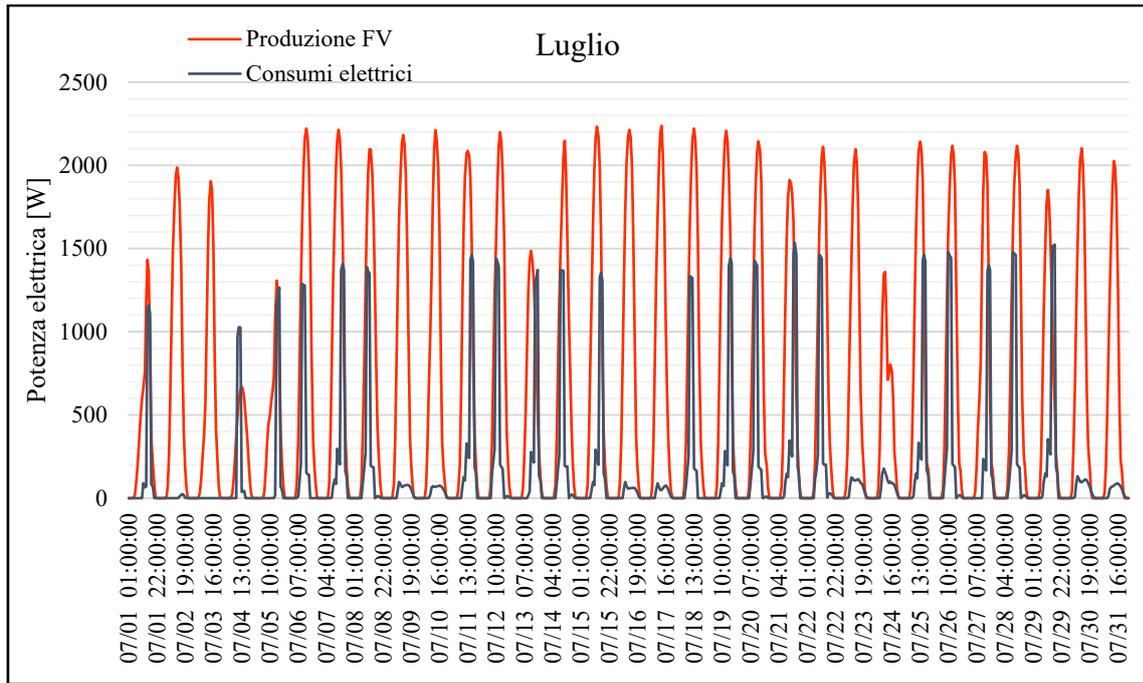


Figura 6.33: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Luglio - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

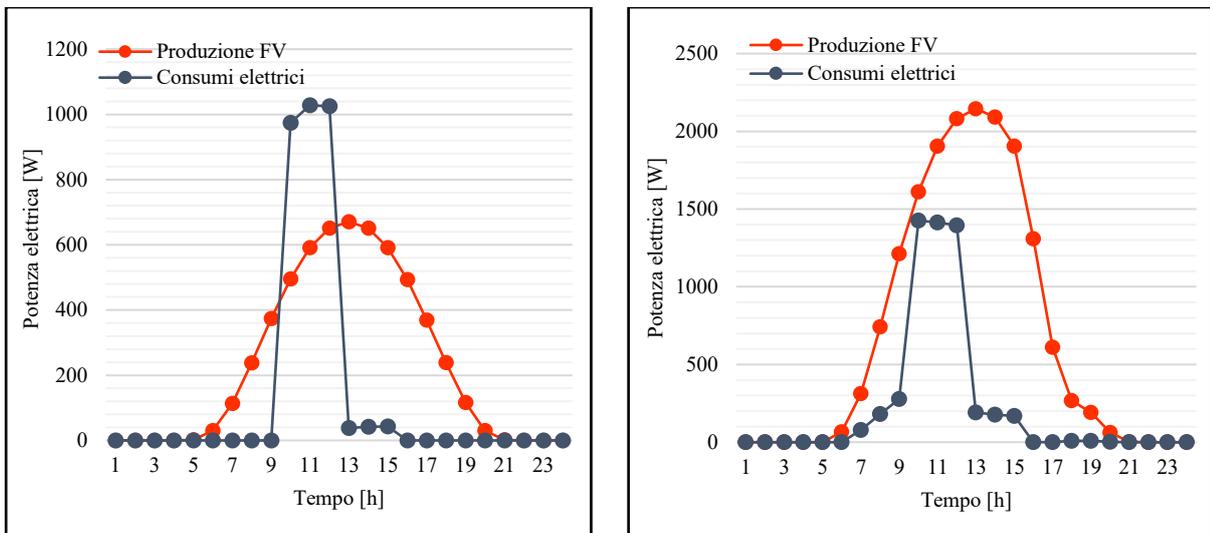


Figura 6.34: Analisi della generazione e dei consumi rispettivamente del 4 e 20 Luglio - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Infine per il mese di Novembre si sono considerati i giorni 3 e 28 Novembre, che rappresentano rispettivamente un giorno a cielo sereno e un giorno a cielo coperto.

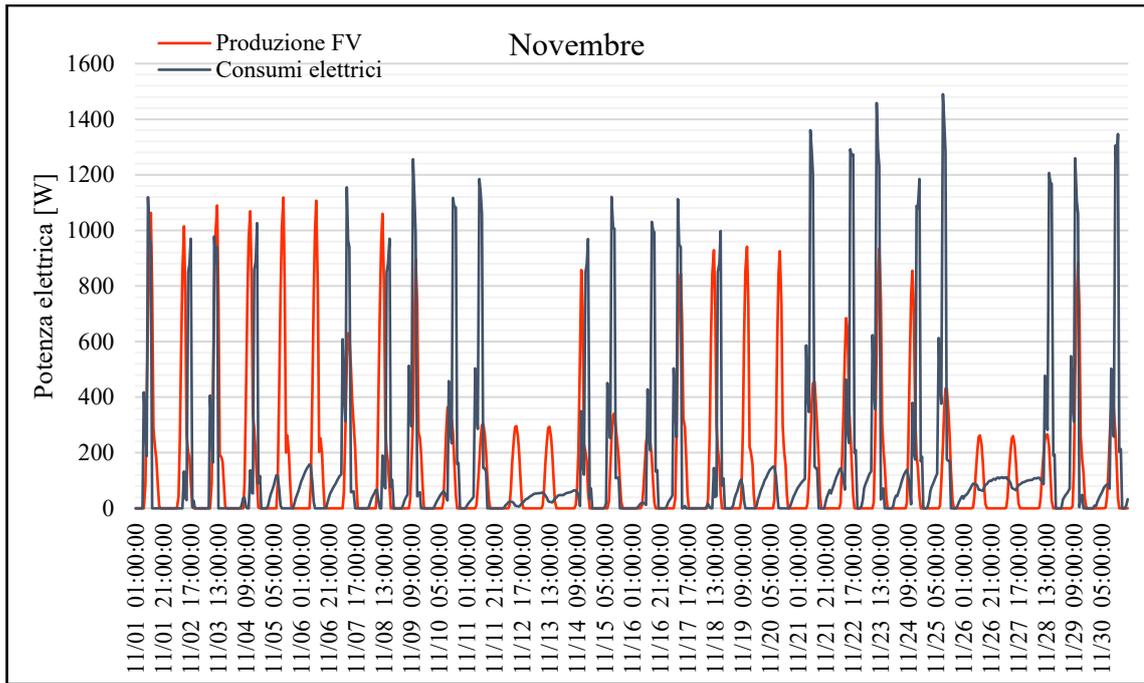


Figura 6.35: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Novembre - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

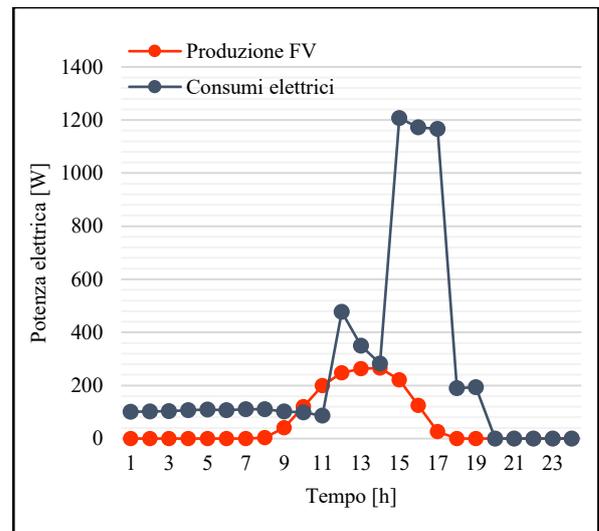
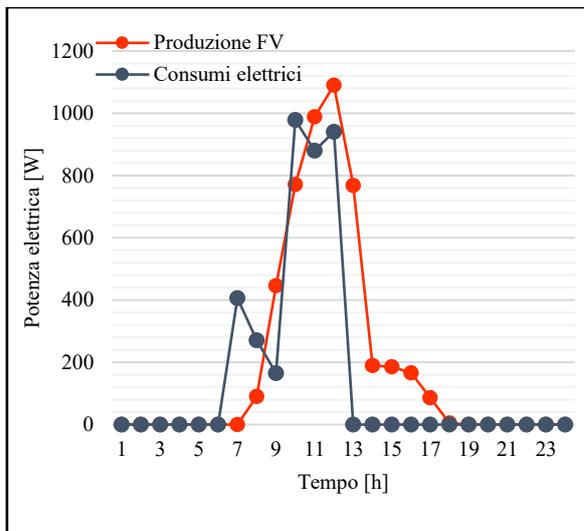


Figura 6.36: Analisi della generazione e dei consumi rispettivamente del 3 e 28 Novembre - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

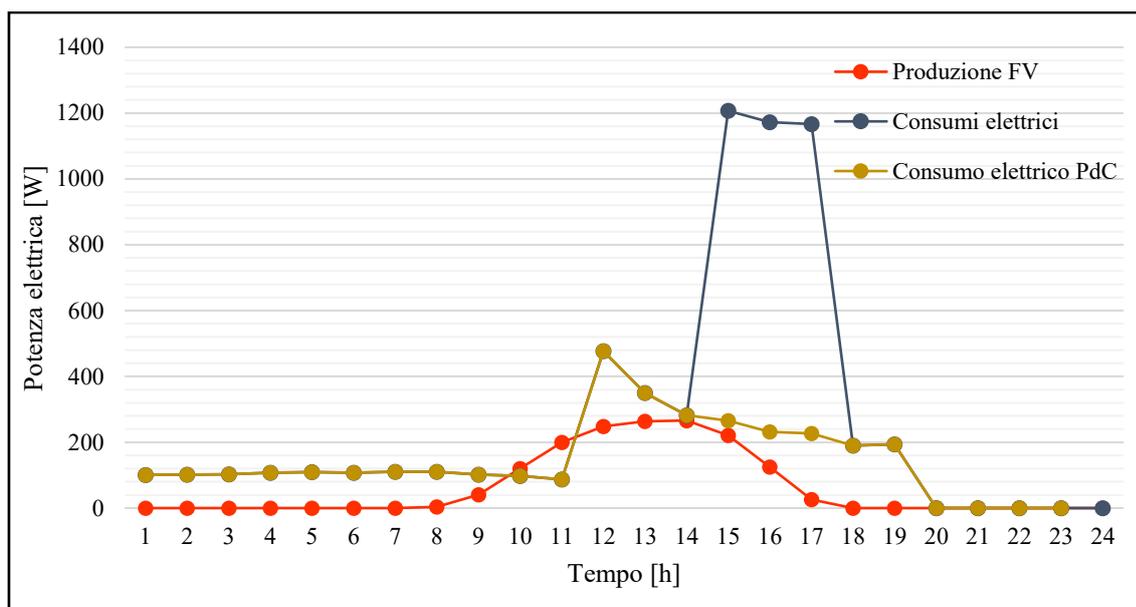


Figura 6.37: Consumi elettrici del 20 Novembre - Sala Riunioni - Caso 2 allineato

Visualizzati nel dettaglio gli andamenti più rilevanti della generazione fotovoltaica e dei carichi elettrici, è utile procedere con un'analisi generale.

Come mostrato nella tabella seguente, i mesi del periodo di riscaldamento per cui si verifica un maggiore consumo di energia elettrica sono Gennaio e Dicembre, con consumi dell'ordine dei 140 kWh, mentre per il periodo di raffrescamento il mese Luglio possiede il consumo maggiore, pari a 116 kWh. La produzione elettrica dei moduli fotovoltaici è massima nel periodo Giugno-Luglio, pari rispettivamente a 424 e 466 kWh mensili, mentre risulta minima nel periodo Dicembre-Gennaio, con rispettivamente 82 e 94 kWh di energia mensilmente prodotta. Nei mesi di Giugno e Luglio l'autosufficienza raggiunge un valore pari al 90%, con una quota di utilizzo dell'energia elettrica prodotta – in altre parole l'autoconsumo - che si attesta intorno al 20%.

Nel periodo Dicembre-Gennaio si raggiunge una quota di autoconsumo pari al 40% mentre l'autosufficienza è pari al 27% circa. Questo valore è indice di una minore autonomia del modulo abitativo e sta a significare che i consumi elettrici sono coperti attraverso un maggiore prelievo dalle batterie – laddove vi è una quota di energia disponibile – o dalla rete elettrica.

Tabella 6.17: Analisi elettrica mensile e annuale della Sala Riunioni – Caso 2 allineato

Mese	E_{FV} [kWh]	E_C [kWh]	AC [%]	AP [%]
Gennaio	94	140	41	27
Febbraio	127	121	37	38
Marzo	203	98	24	50
Aprile	283	63	16	73
Maggio	385	71	15	80
Giugno	424	93	20	90
Luglio	466	116	23	91
Agosto	387	1	0	100
Settembre	238	75	19	61
Ottobre	150	70	23	50
Novembre	97	117	40	34
Dicembre	82	141	39	23
Annuale	2936	1104	20	52

In Figura 6.38 sono riportati i consumi elettrici e la produzione elettrica mensili per la Sala Riunioni. Si nota un forte scarto tra energia elettrica prodotta e energia elettrica consumata, specialmente nei mesi estivi, laddove la produzione fotovoltaica è maggiore. Nei mesi di Febbraio e Novembre la produzione e la domanda di energia elettrica sono comparabili. Questo concetto è chiarito dal grafico di Figura 6.39, in cui sono riportate le quote di autoconsumo e autoproduzione mensili. Nei mesi di Giugno e Luglio si verifica un surplus di produzione elettrica dei moduli fotovoltaici, grazie a una più alta radiazione solare incidente, mentre si osserva un maggiore equilibrio nei mesi di Febbraio e Novembre.

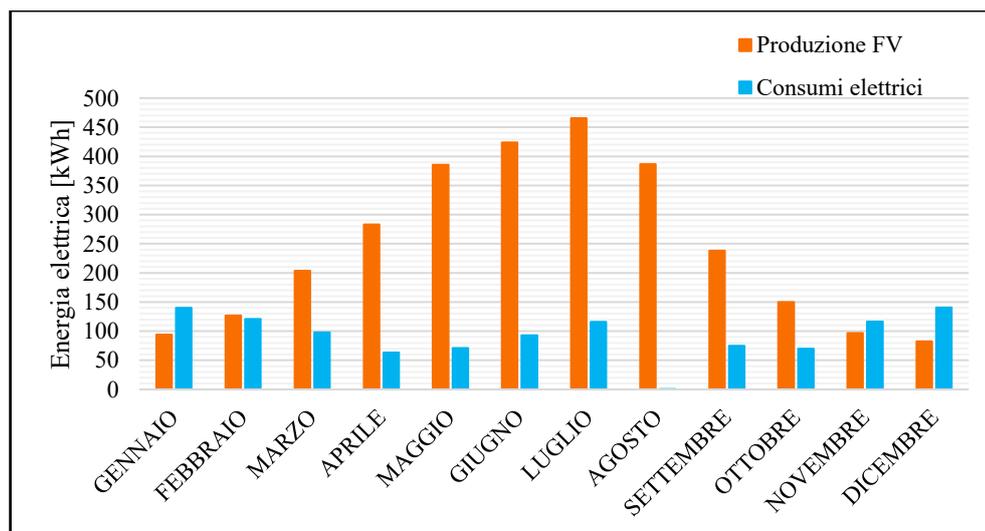


Figura 6.38: Produzione e consumi elettrici mensili – Sala Riunioni – Caso 2 allineato

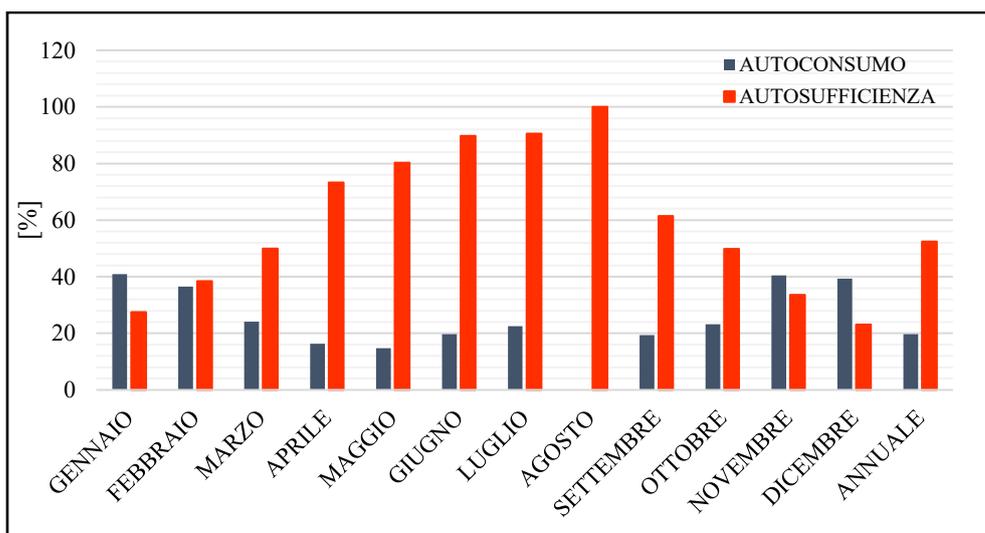


Figura 6.39: Autoconsumo e Autosufficienza - Sala Riunioni – Caso 2 allineato

6.3.1.2 Sala Studio

In questo paragrafo sono analizzati gli andamenti dei carichi elettrici e della generazione fotovoltaica della Sala Studio, sempre per il Caso 2 allineato. I consumi elettrici comprendono la quota di illuminazione, ventilazione meccanica, postazioni elettriche e il consumo per il riscaldamento e raffrescamento. Risulta interessante mostrare come i diversi contributi incidono sul consumo elettrico annuale totale, mostrato nel grafico di Figura 6.40.

La quota di energia elettrica utilizzata per il riscaldamento e raffrescamento dell'ambiente rappresenta la metà dei consumi elettrici annuali (876 kWh annui), seguita dalle postazione elettriche per l'uso dei PC (581 kWh), l'illuminazione (220 kWh) e la ventilazione meccanica (67 kWh).

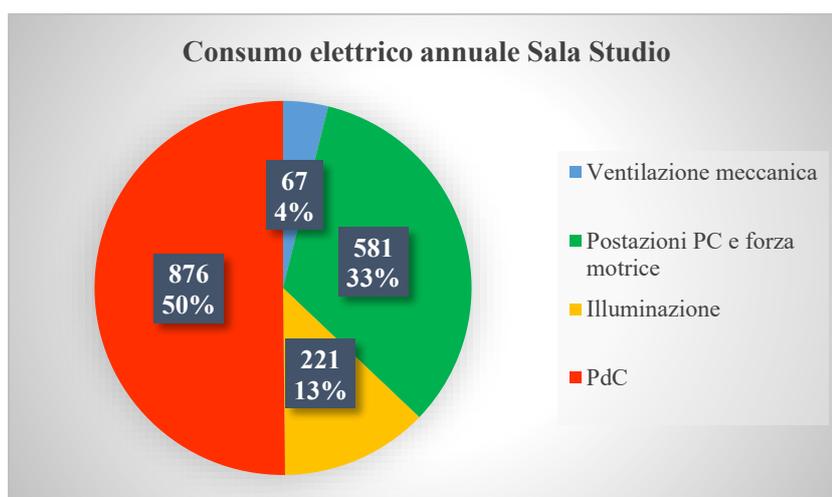


Figura 6.40: Quote di Consumo Elettrico Annuale [kWh] - Sala Studio - Caso 2 allineato

Come effettuato per la Sala Riunioni, si riportano per la Sala Studio i grafici degli andamenti della generazione fotovoltaica e dei carichi elettrici per i mesi più significativi di ciascuna stagione, ossia Gennaio, Aprile, Luglio e Novembre.

Per il mese di Gennaio, i giorni di autosufficienza sono minori rispetto ai giorni in cui i consumi superano la produzione. Ci sono tuttavia delle ore in cui la produzione riesce a sopperire ai consumi, specialmente nel fine settimana quando il locale risulta chiuso. Analizzando in particolar modo il 20 Gennaio, si possono riportare degli esempi di autoproduzione e autoconsumo.

Inoltre si sono analizzati i giorni 18 e 27 Gennaio che rappresentano rispettivamente un giorno di cielo coperto e sereno.

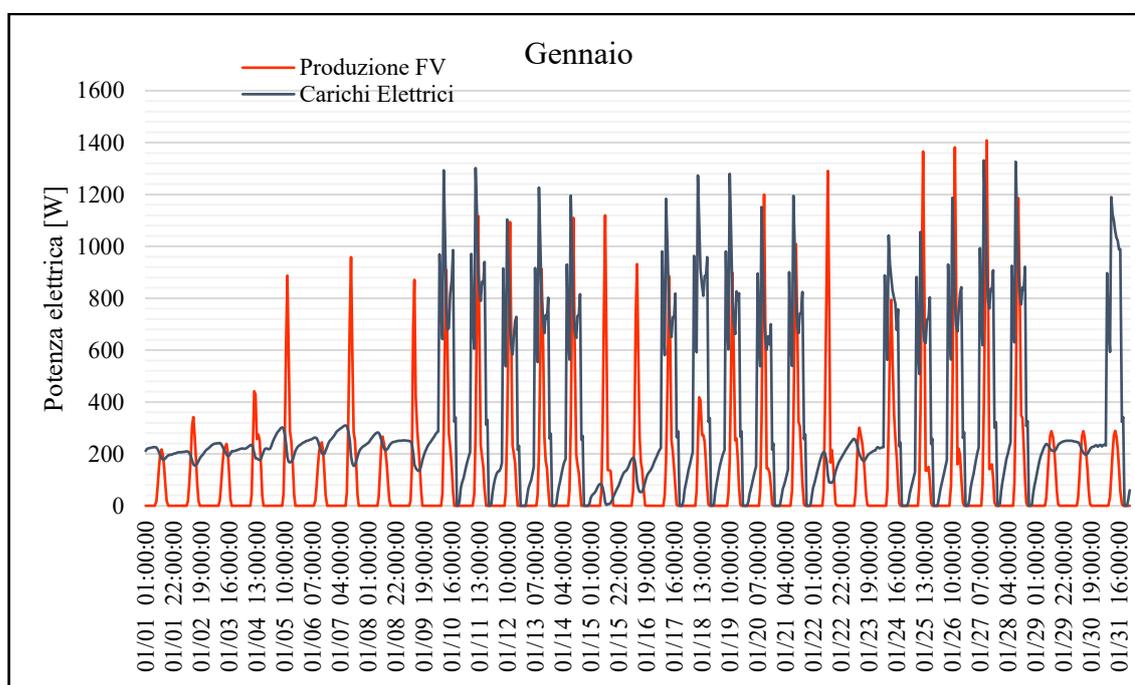


Figura 6.41: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Gennaio - Sala Studio - Caso 2 allineato

Per il giorno 20 Gennaio, in Figura 6.42 l'energia elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici è pari a 3,7 kWh mentre l'energia elettrica richiesta è pari a 9,2 kWh. Essendo i consumi elettrici notevoli, la quota di autosufficienza è bassa e pari al 33% mentre la quota di autoconsumo è dell'86%. Essendo un giorno particolarmente freddo, i consumi elettrici associati alla pompa di calore rappresentano circa il 50 % dei consumi totali e sono pari a 5,47 kWh (Figura 6.43).

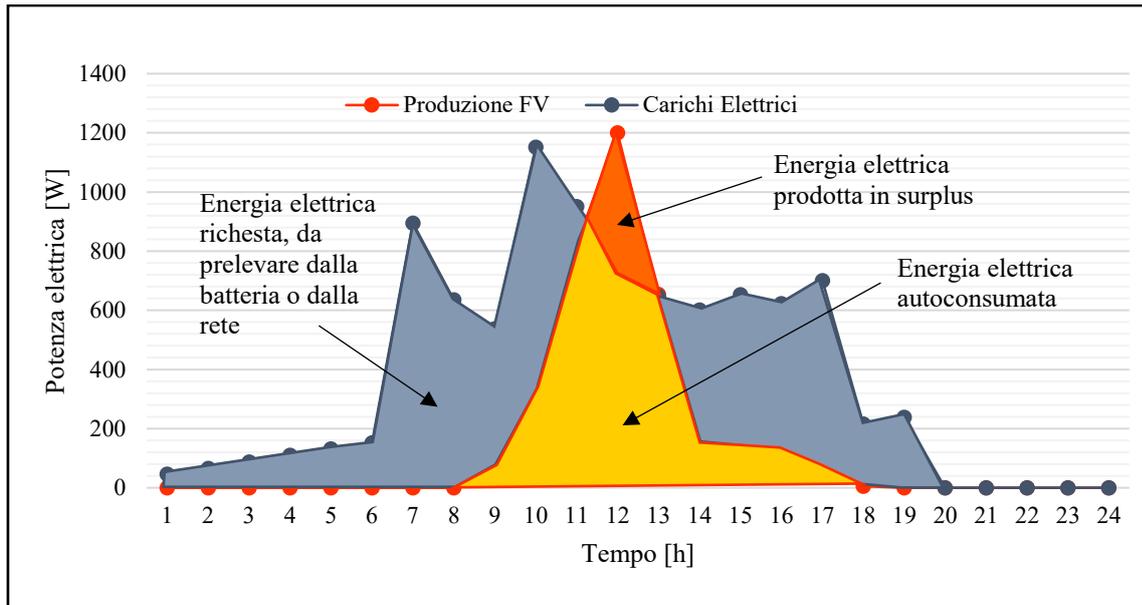


Figura 6.42: Quote di generazione, consumo e autoconsumo del 20 Gennaio - Sala Studio - Caso 2 allineato

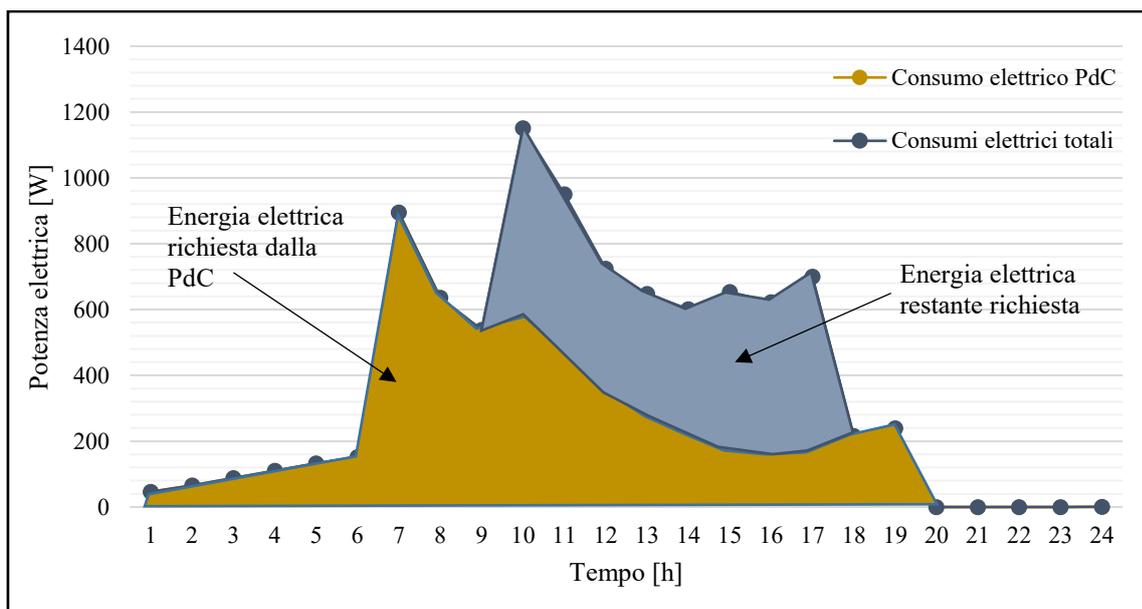


Figura 6.43: Quota di energia elettrica richiesta dalla PdC il 20 Gennaio - Sala Studio - Caso 2 allineato

Il 18 Gennaio la produzione elettrica risulta esigua e questo determina un autoconsumo del 100% ma un' autosufficienza pari a solo il 19% mentre la situazione migliora nella condizione di cielo coperto ossia per il 27 Gennaio, quando la produzione determina un' autosufficienza del 32% circa.

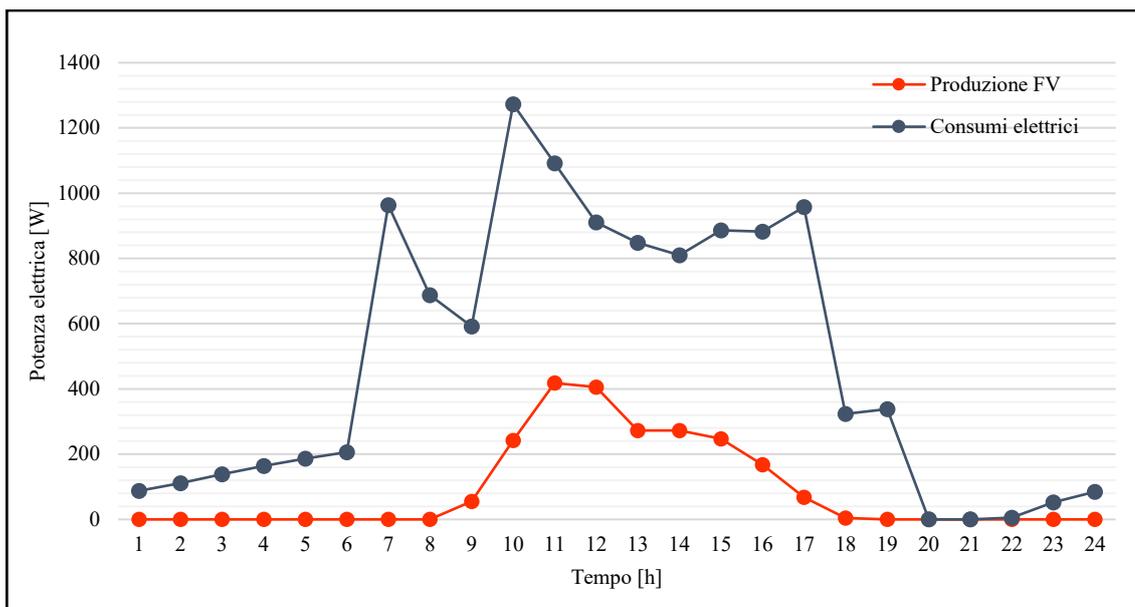


Figura 6.44: Analisi della generazione e dei consumi del 18 Gennaio - Sala Studio - Caso 2 allineato

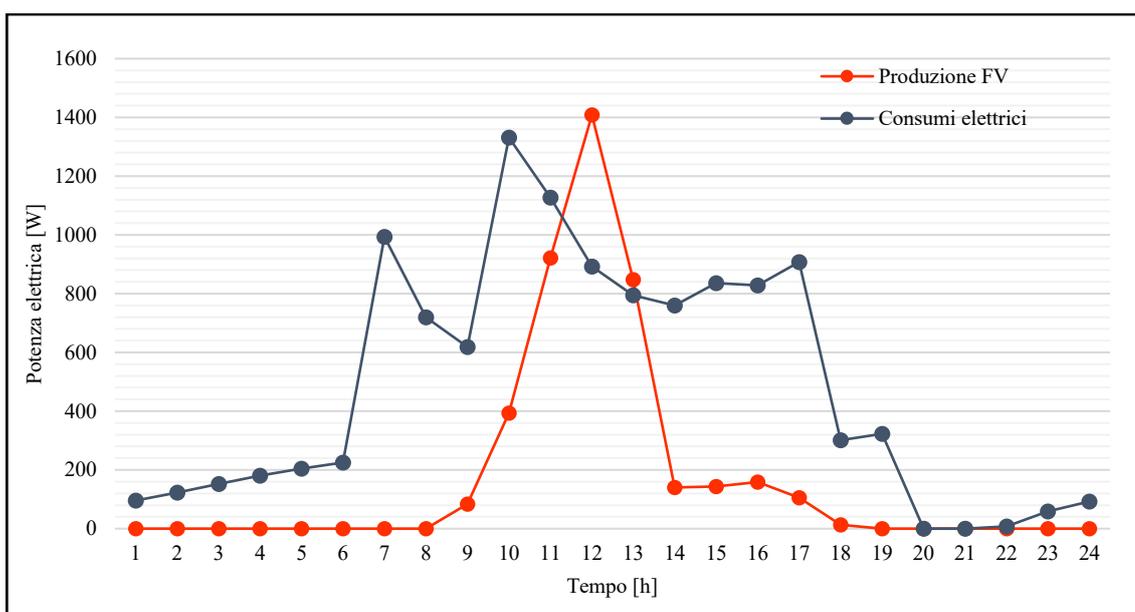


Figura 6.45: Analisi della generazione e dei consumi del 27 Gennaio - Sala Studio - Caso 2 allineato

Ad Aprile, rientrando ancora nel periodo di riscaldamento, la situazione cambia notevolmente, grazie alla maggiore radiazione solare che determina una maggiore energia elettrica prodotta. Ad esempio il 18 di Aprile, si nota come, seppur essendo il giorno del mese con un consumo elettrico più importante, la produzione fotovoltaica riesce a coprire

circa il 70% dei consumi elettrici giornalieri. L'autosufficienza è dunque del 70%. L'autoconsumo è invece pari al 39%, in quanto solo meno della metà dell'energia elettrica prodotta viene utilizzata.

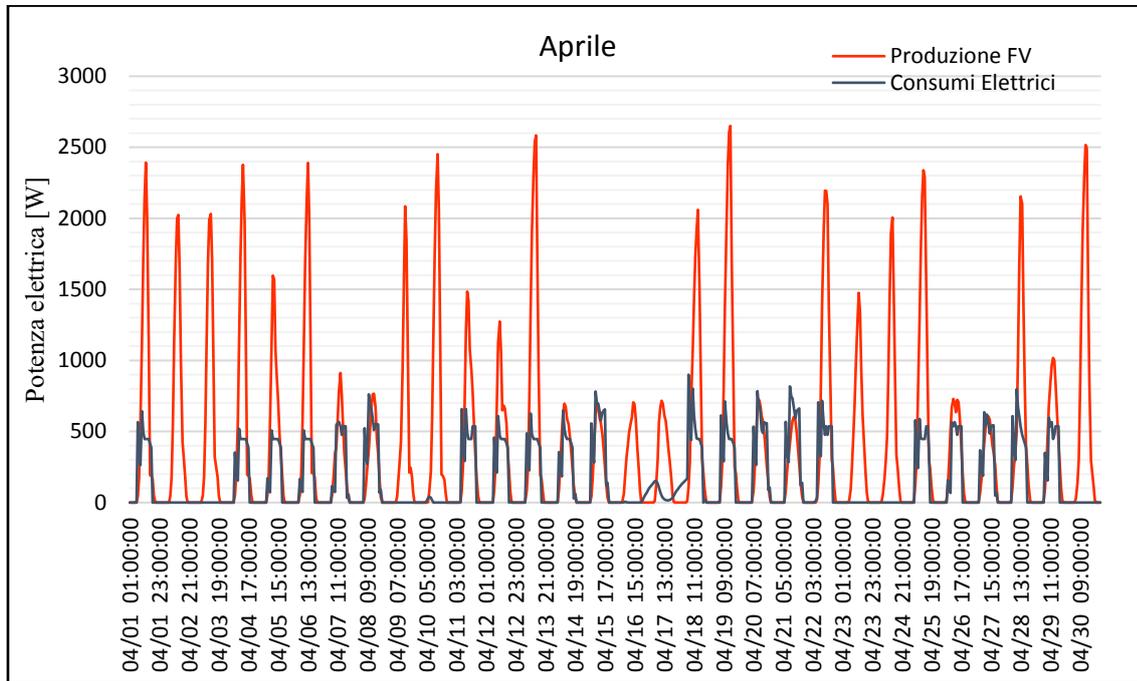


Figura 6.46: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Aprile - Sala Studio - Caso 2 allineato

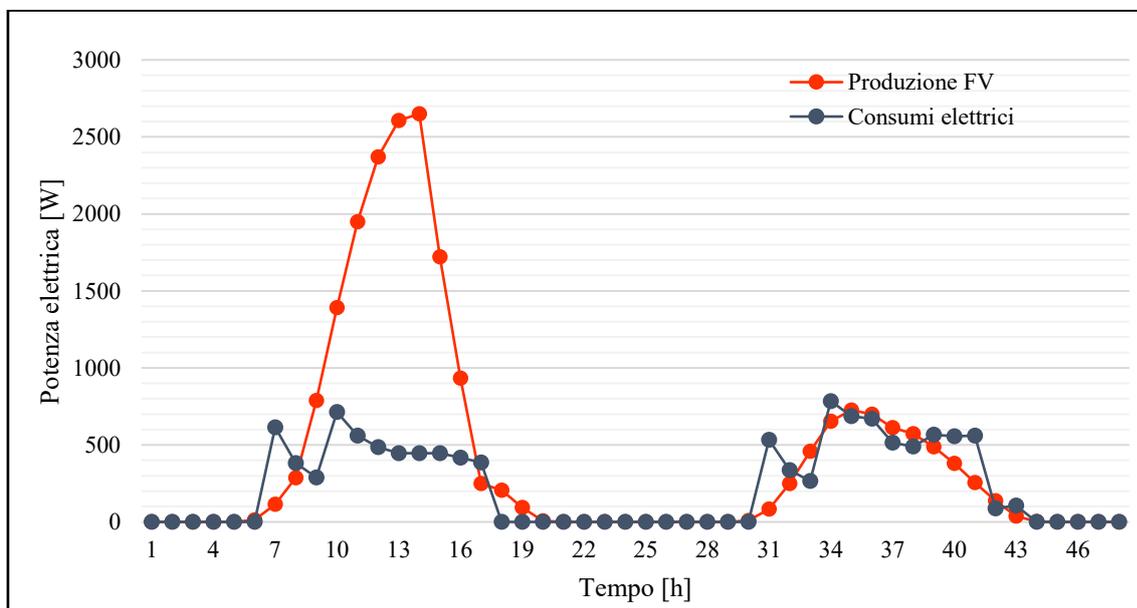


Figura 6.47: Analisi della generazione e dei consumi del 19 e 20 Aprile - Sala Studio - Caso 2 allineato

Luglio risulta invece essere il mese con una maggiore autosufficienza, come ci viene mostrato in Figura 6.48, che riporta la situazione mensile relativa alla produzione e ai consumi elettrici. Per il 20 di Luglio, si verifica un'autosufficienza del 100% con una quota di energia elettrica auto-consumata pari a circa il 37% dell'energia elettrica prodotta totale. Questo però non si verifica per il giorno 4 Luglio, che rappresenta un giorno a cielo coperto, con una produzione fotovoltaica pari a circa 5 kWh, contro quella del 20 Luglio, pari a 16 kWh. Per il 4 Luglio l'autosufficienza è comunque alta, ma pari all'89% (Figura 6.49).

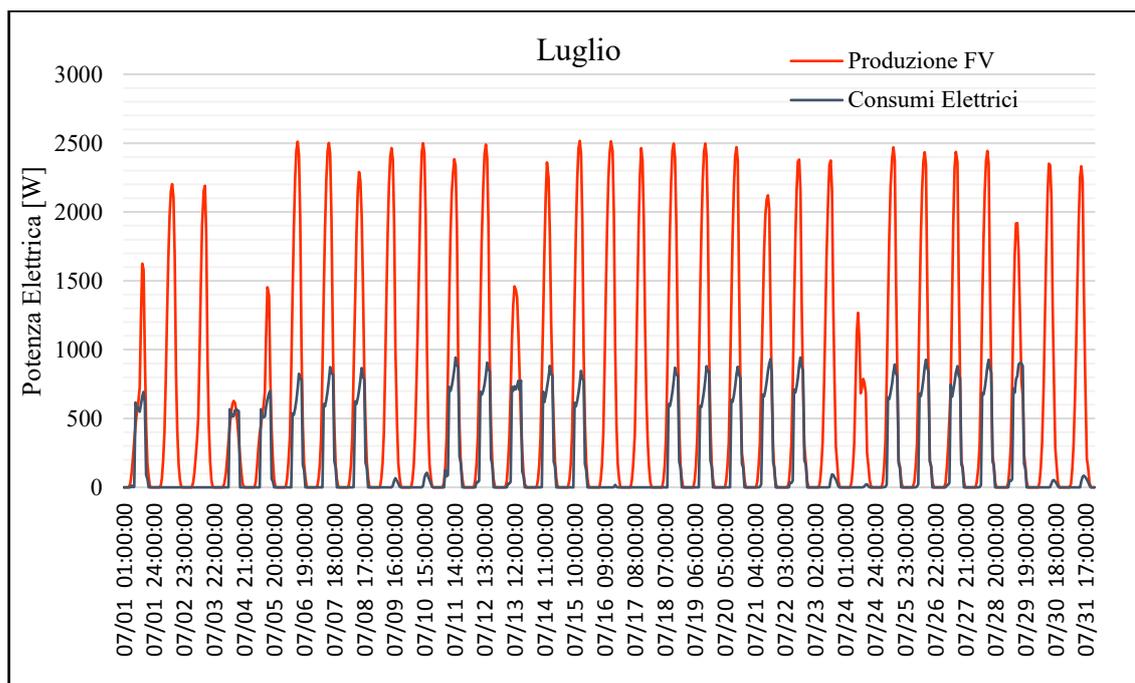


Figura 6.48: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Luglio – Sala Studio - Caso 2 allineato

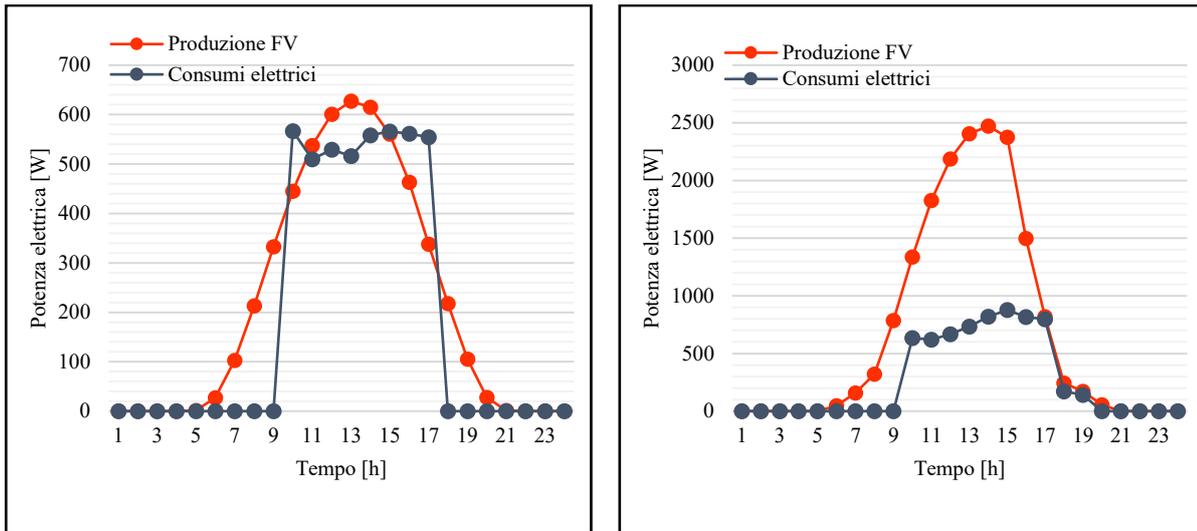


Figura 6.49: Analisi della generazione e dei consumi rispettivamente del 4 e 20 Luglio - Sala Studio - Caso 2 allineato

In Figura 6.50 sono mostrati gli andamenti della produzione e consumi elettrici per i giorni 28 e 29 Luglio. Si osserva come l'accoppiamento dei carichi sia variabile e come non sia perfettamente in linea per il 28 Luglio. In Figura 6.51 è invece mostrato l'andamento del carico elettrico per raffrescamento e dei carichi elettrici totali.

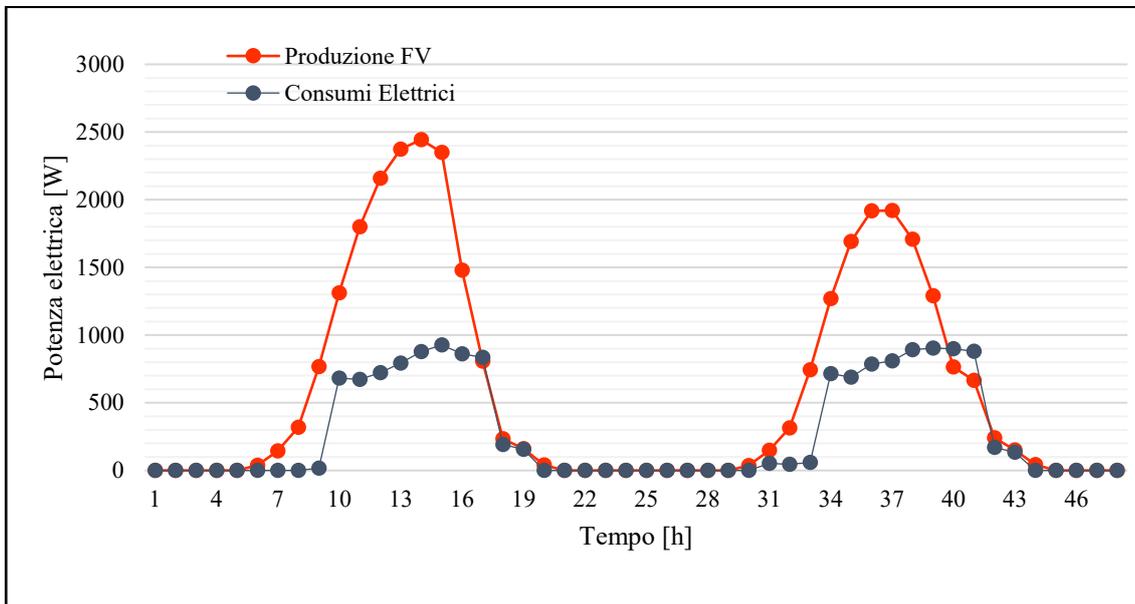


Figura 6.50: Analisi della generazione e dei consumi del 28 e 29 Luglio - Sala Studio - Caso 2 allineato

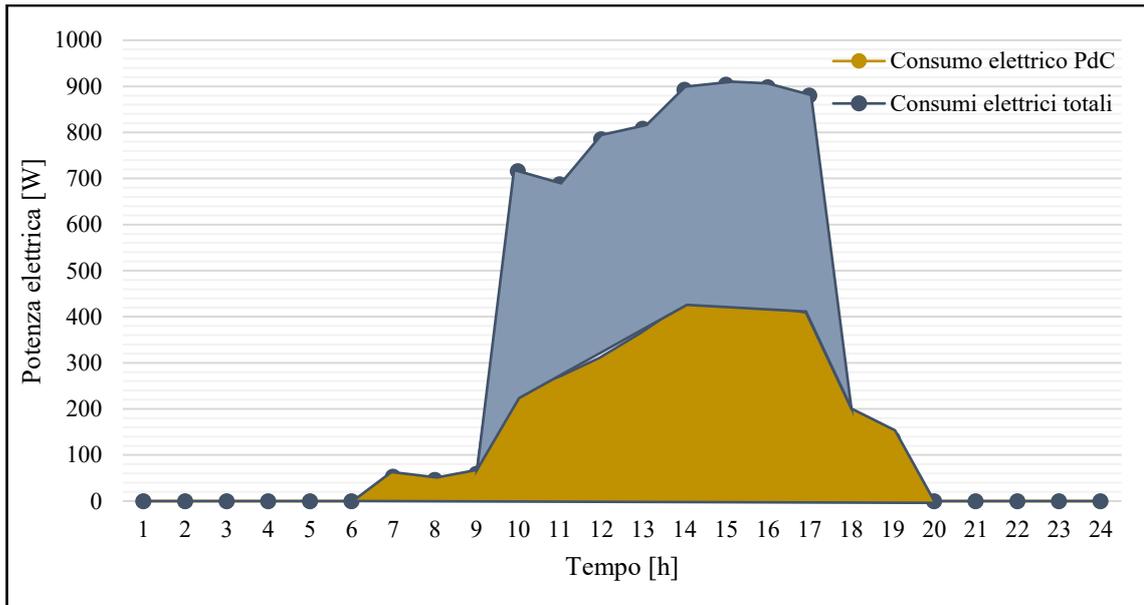


Figura 6.51: Consumi elettrici PdC del 28 Luglio – Sala Studio - Caso 2 allineato

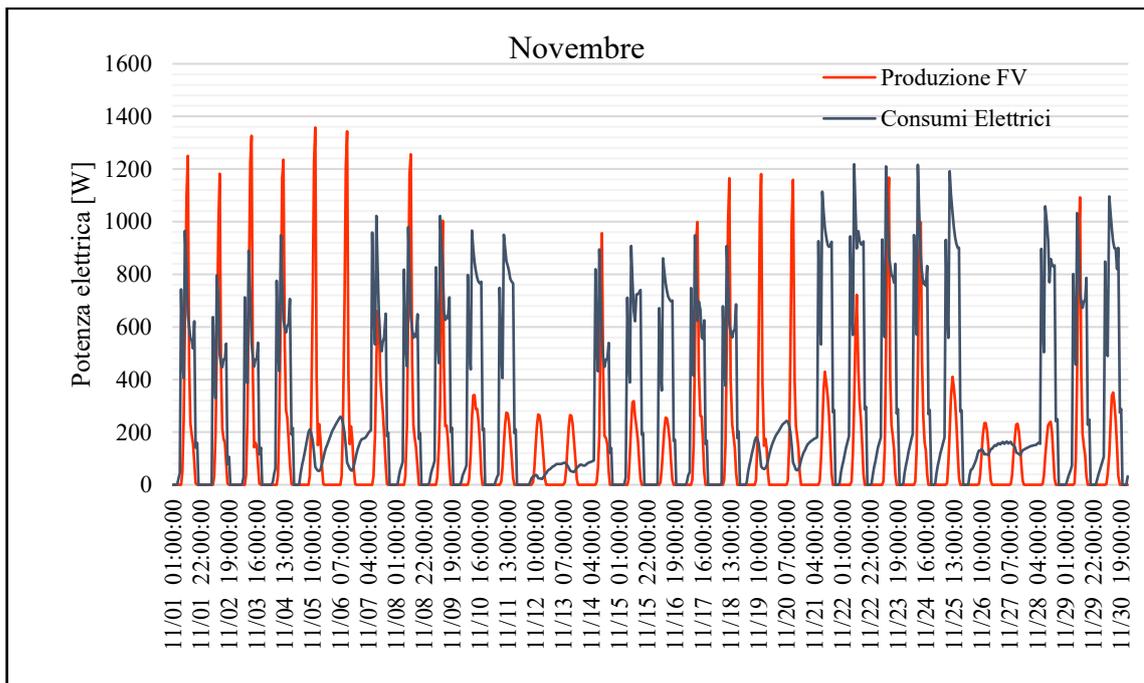


Figura 6.52: Produzione fotovoltaica e consumi elettrici di Novembre – Sala Studio -
Caso 2 allineato

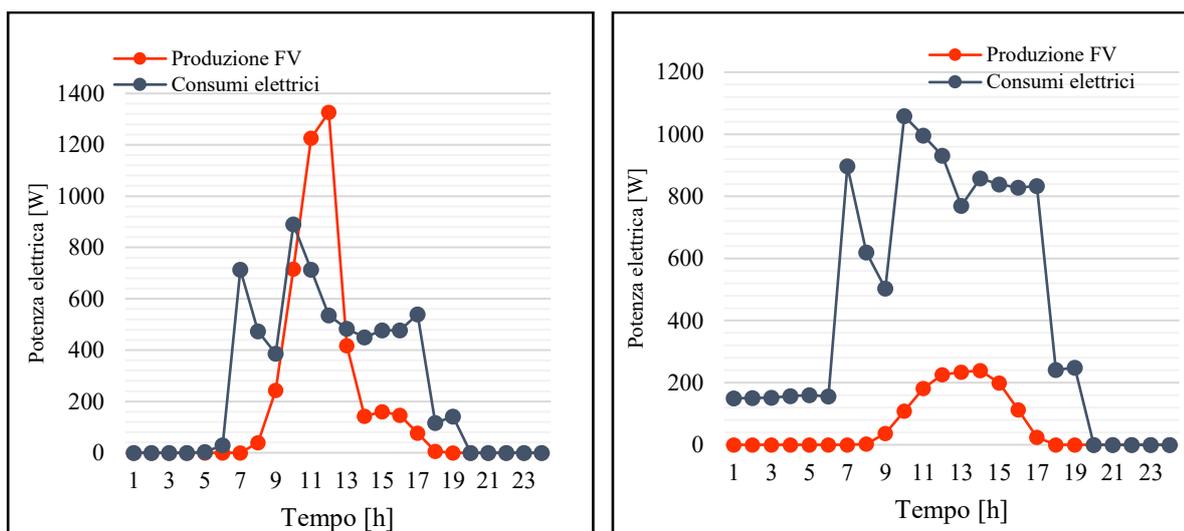


Figura 6.53: Analisi della generazione e dei consumi rispettivamente del 3 e 28 Novembre - Sala Studio - Caso 2 allineato

Successivamente si è voluta dare una visione generale sulla generazione fotovoltaica e sui consumi elettrici sia mensili che annuali della Sala Studio.

In Tabella 6.18 sono riportati i valori relativi alla produzione elettrica dei moduli fotovoltaici, al consumo elettrico, all'autoproduzione e all'autoconsumo mensili e annuali.

L'energia elettrica prodotta, come prevedibile, risulta minore nei mesi di Gennaio e Dicembre, pari rispettivamente a 87 e 75 kWh mensili. In tali mesi i consumi elettrici sono notevoli a causa dell'elevata energia termica richiesta per riscaldamento. Per Gennaio si ha un consumo elettrico di 243 kWh comparabile a quello di Dicembre, pari a 246 kWh. In tali mesi la quota di autoconsumo è dell'ordine del 70%. Seppure elevato, la quota di consumi elettrici coperta dal fotovoltaico – in altre parole l'autosufficienza o autoproduzione – è solo del 27% per Gennaio e del 22% per Dicembre. La situazione migliora nel mese di Aprile, all'interno del periodo di riscaldamento. In questo mese l'autosufficienza sale all'81% e l'autoconsumo scende al 33%, essendo la produzione aumentata fino a 281 kWh e i consumi elettrici scesi a 113 kWh.

Nei mesi di Giugno e Luglio la produzione aumenta al punto tale da coprire i consumi elettrici per una quota pari al 99%.

Tabella 6.18: Analisi elettrica mensile e annuale della Sala Studio – Caso 2 allineato

Mese	E_{FV} [kWh]	E_C [kWh]	AC [%]	AP [%]
Gennaio	87	243	76	27
Febbraio	122	208	66	39
Marzo	209	176	44	52
Aprile	281	113	33	81
Maggio	386	91	23	96
Giugno	419	108	26	99
Luglio	468	132	28	99
Agosto	396	0	0	100
Settembre	243	88	30	83
Ottobre	148	126	45	53
Novembre	89	216	73	30
Dicembre	75	246	71	22
Annuale	2924	1746	31	52

In Figura 6.54 Si può notare come i consumi superino la produzione nei mesi di Gennaio, Febbraio, Novembre e Dicembre, come siano paragonabili nei mesi di Marzo e Ottobre e come nel periodo da Aprile a Settembre l'energia fotovoltaica copra mensilmente la maggioranza dei consumi, come mostrato anche in Figura 6.55.

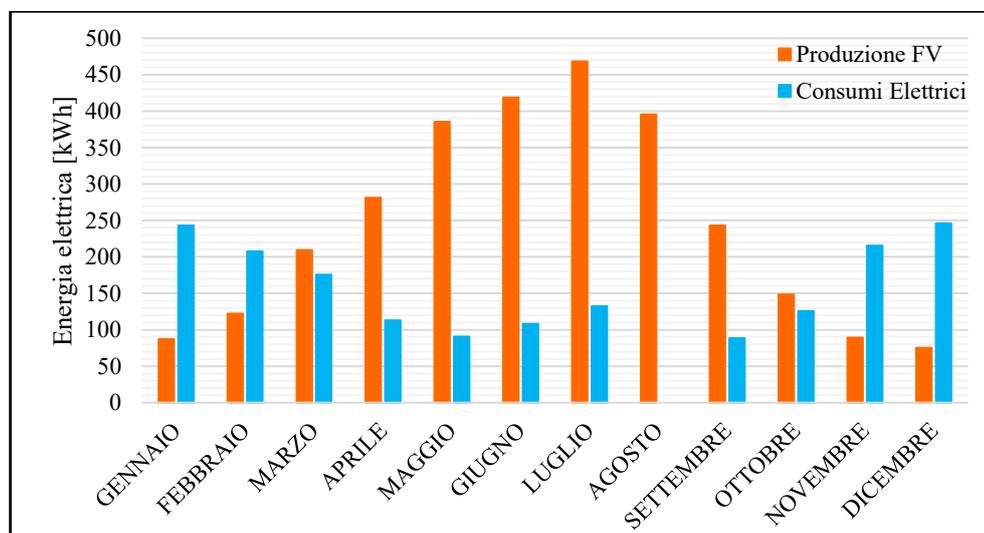


Figura 6.54: Produzione e consumi elettrici mensili – Sala Studio – Caso 2 allineato

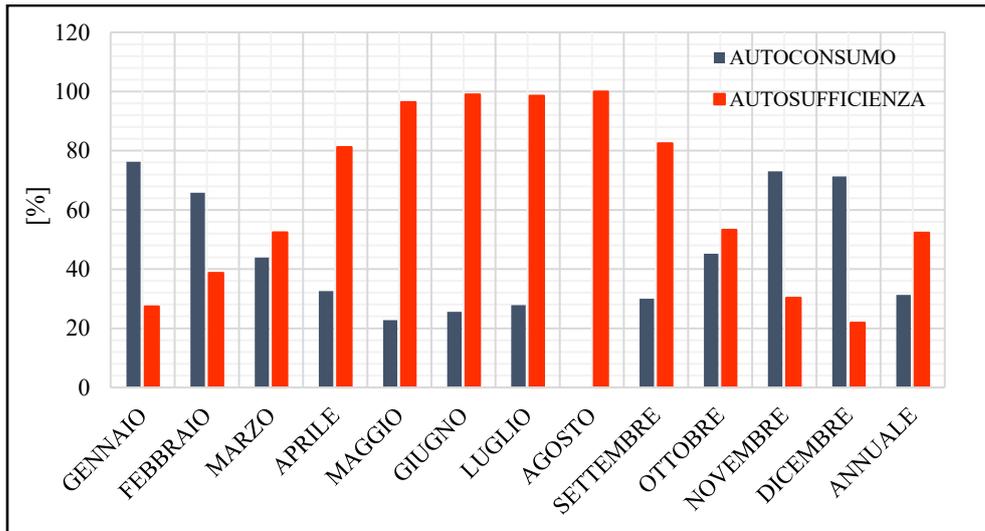


Figura 6.55: Autoconsumo e Autosufficienza - Sala Studio – Caso 2 allineato

6.3.2 Caso 2 senza ostacoli

In questo paragrafo è riportata l'analisi dei risultati per il Caso 2 senza ostacoli, che rappresenta un caso ideale. I grafici a torta riportati mostrano in che modo i consumi elettrici sono ripartiti per ciascun ambiente. Ciò che si può notare è che i consumi elettrici per ventilazione meccanica, per le postazioni dei PC, per l'illuminazione e per il proiettore sono rimasti invariati rispetto al caso precedente. L'assenza degli ostacoli infatti, influenza solamente i consumi termici ed elettrici per riscaldamento e raffrescamento in quanto entra in gioco un maggiore quantitativo di apporti di calore solari. Nel caso della Sala Riunioni i consumi elettrici della pompa di calore diminuiscono, passando da 490 kWh del caso con ostacoli a 466 kWh annui senza ostacoli. Per quanto riguarda la Sala studio si passa da un consumo di 876 kWh del caso con ostacoli a 856 kWh annui senza ostacoli. La complessiva diminuzione dei consumi elettrici della pompa di calore nel caso senza ostacoli è dovuta al fatto che la riduzione dei consumi per riscaldamento – causata da una maggiore radiazione solare incidente sul modulo abitativo – è maggiore rispetto all'aumento della quota di consumi per raffrescamento.

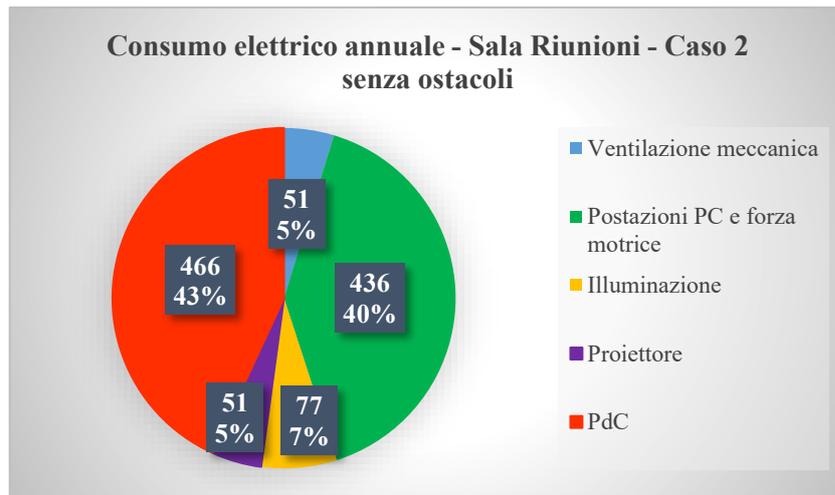


Figura 6.56: Quote di Consumo Elettrico Annuale [kWh] - Sala Riunioni - Caso 2 senza ostacoli

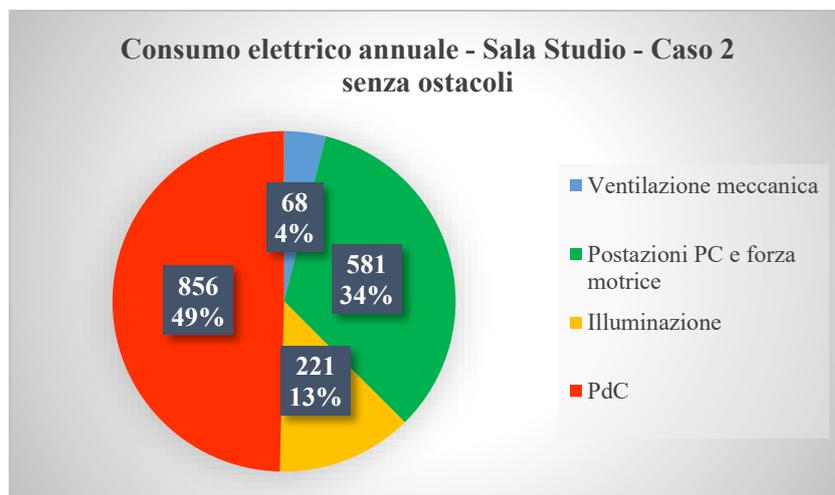


Figura 6.57: Quote di Consumo Elettrico Annuale [kWh] - Sala Studio - Caso 2 senza ostacoli

Nelle tabelle di seguito sono riportati i consumi elettrici e la generazione fotovoltaica mensili e annuali in riferimento rispettivamente alla Sala Riunioni e alla Sala Studio.

Tabella 6.19: Analisi elettrica mensile e annuale della Sala Riunioni – Caso 2 senza ostacoli

Mese	E_{FV} [kWh]	E_C [kWh]	AC [%]	AP [%]
Gennaio	130	126	32	33
Febbraio	186	108	29	51
Marzo	276	89	22	68
Aprile	348	59	15	88
Maggio	441	79	16	90
Giugno	472	105	21	94
Luglio	521	131	24	95
Agosto	453	1	0	100
Settembre	308	84	22	82
Ottobre	212	65	19	62
Novembre	140	105	32	42
Dicembre	111	128	30	26
Annuale	3598	1080	19	64

Tabella 6.20: Analisi elettrica mensile e annuale della Sala Studio – Caso 2 senza ostacoli

Mese	E_{FV} [kWh]	E_C [kWh]	AC [%]	AP [%]
Gennaio	172	195	44	39
Febbraio	238	153	36	56
Marzo	327	134	29	70
Aprile	381	90	22	96
Maggio	469	143	30	97
Giugno	489	174	35	98
Luglio	552	224	39	96
Agosto	497	4	1	100
Settembre	354	134	36	94
Ottobre	260	102	30	76
Novembre	184	171	45	49
Dicembre	146	203	43	31
Annuale	4067	1727	30	71

6.3.3 Caso 2 non allineato

Come per il caso precedente, in questo paragrafo si riportano i consumi elettrici annuali e le quote di energia elettrica mensili e annuali prodotta, in riferimento al caso non allineato.

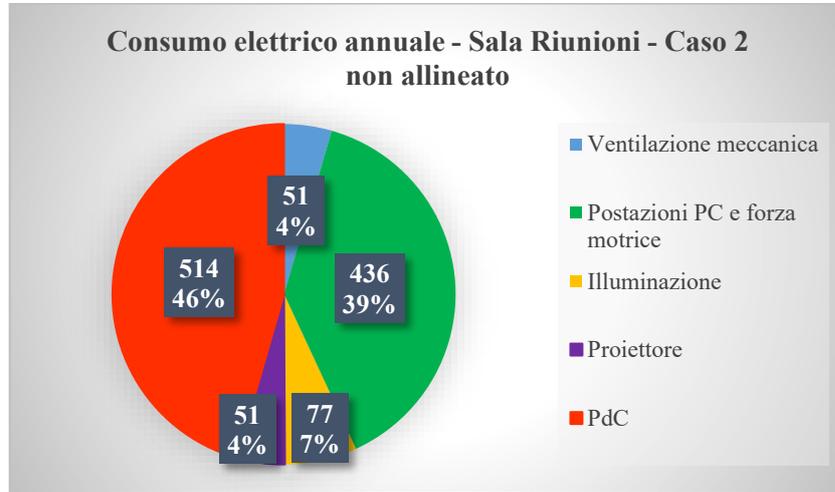


Figura 6.58: Quote di Consumo Elettrico Annuale [kWh] - Sala Riunioni - Caso 2 non allineato

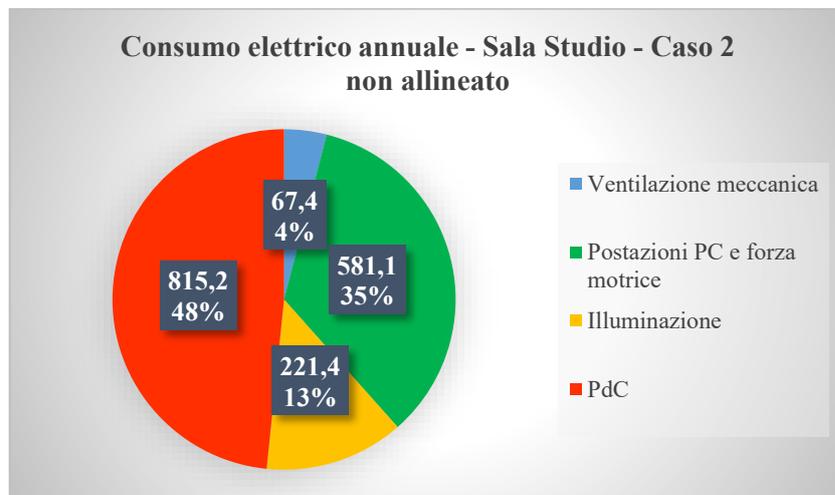


Figura 6.59: Quote di Consumo Elettrico Annuale [kWh] - Sala Studio - Caso 2 non allineato

Tabella 6.21: Analisi elettrica mensile e annuale della Sala Riunioni – Caso 2 non allineato

Mese	E _{FV} [kWh]	E _C [kWh]	AC [%]	AP [%]
Gennaio	82	153	52	28
Febbraio	114	132	44	38
Marzo	188	104	28	50
Aprile	261	66	18	71
Maggio	351	66	14	73
Giugno	387	83	17	81
Luglio	422	102	20	81
Agosto	351	0	0	100
Settembre	218	69	19	58
Ottobre	137	74	26	49
Novembre	85	127	49	32
Dicembre	71	153	52	24
Annuale	2666	1128	20	48

Tabella 6.22: Analisi elettrica mensile e annuale della Sala Studio – Caso 2 non allineato

Mese	E _{FV} [kWh]	E _C [kWh]	AC [%]	AP [%]
Gennaio	107	225	63	30
Febbraio	143	190	56	42
Marzo	238	164	38	55
Aprile	314	108	29	84
Maggio	411	96	22	95
Giugno	444	112	25	99
Luglio	500	143	28	97
Agosto	433	0	0	100
Settembre	275	98	29	82
Ottobre	173	118	39	57
Novembre	108	200	61	33
Dicembre	91	231	57	23
Annuale	3237	1685	29	55

6.3.4 Confronto tra le diverse configurazioni del Caso 2

In questo paragrafo è presentato un confronto tra i vari sotto-casi del Caso 2.

Partendo dall'analisi della generazione fotovoltaica, la configurazione ideale è rappresentata dal Caso 2 senza ostacoli, con una produzione elettrica annua pari a 3598 kWh per la Sala Riunioni e pari a 4067 kWh per la Sala Studio. I casi reali, ossia il caso allineato e il caso non allineato, hanno una produzione elettrica minore.

In riferimento alla Sala Riunioni, il Caso 2 allineato ha una produzione elettrica annua pari a 2936 kWh mentre il caso non allineato presenta una produzione pari a 2666 kWh annui. Questo si verifica perché moduli fotovoltaici esposti a Sud-est e Nord-Ovest, nella prima configurazione, producono maggiormente rispetto a quelli esposti a Est e a Ovest nella seconda configurazione.

In Tabella 6.23 sono riportate le riduzioni, espresse in percentuale, della produzione fotovoltaica nei casi reali, in relazione alla produzione fotovoltaica nel caso ideale. Si nota nel Caso 2 allineato una riduzione annuale del 18% mentre per il caso con edificio ruotato, una riduzione maggiore, pari al 26%.

Tabella 6.23: Riduzione mensile e annuale [%] della generazione fotovoltaica rispetto al caso senza ostacoli – Sala Riunioni

Riduzione della produzione fotovoltaica [%]		
	Caso 2 allineato	Caso 2 non allineato
Gennaio	28	38
Febbraio	32	38
Marzo	26	32
Aprile	19	25
Maggio	13	21
Giugno	10	18
Luglio	11	19
Agosto	15	23
Settembre	23	29
Ottobre	29	35
Novembre	31	39
Dicembre	26	36
Annuale	18	26

Nella Figura 6.60 sono riportate le quote di produzione elettrica mensile per il caso ideale e per i due casi reali. Le differenze tra i diversi casi si acquiscono nella stagione invernale, dove il sole risulta più basso nel cielo e laddove la presenza degli ostacoli si fa sentire maggiormente. Quando il sole è invece più alto, ossia nei mesi estivi, i moduli fotovoltaici, nonostante la presenza degli ostacoli, riescono a captare maggiormente la radiazione solare.

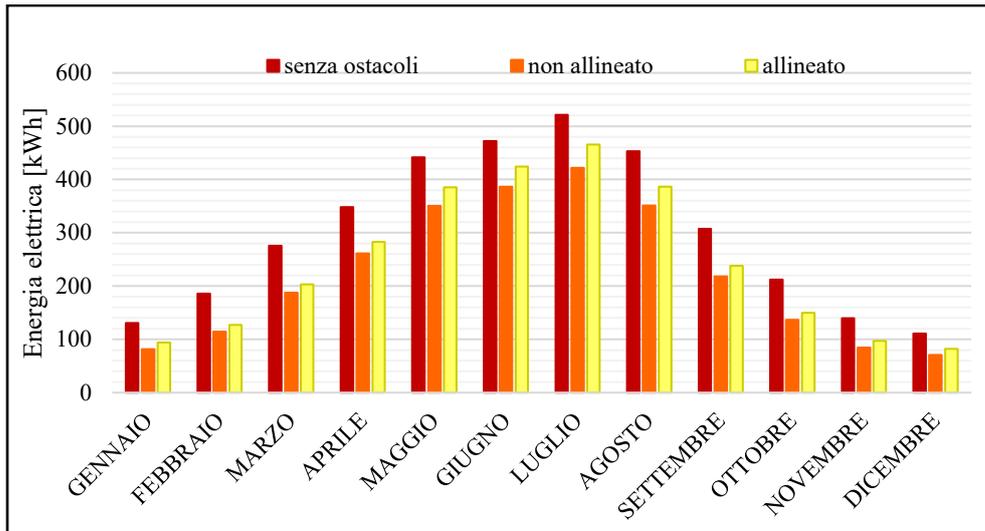


Figura 6.60: Confronto generazione fotovoltaica mensile [kWh] per i tre casi - Sala Riunioni

Per quanto riguarda la Sala Studio, il Caso 2 allineato ha una produzione elettrica annua di 2924 kWh mentre il Caso 2 non allineato ha una produzione elettrica annua di 3237 kWh. La maggiore quantità di energia prodotta nell'ultimo caso è giustificata dal fatto che i moduli fotovoltaici sono orientati verso il Sud pieno, mentre nel caso allineato sono rivolti verso Sud-Ovest.

Anche per la Sala Studio, nei due casi reali si registra una riduzione della produzione fotovoltaica, più significativa nei mesi invernali.

Nel Caso 2 allineato, la produzione fotovoltaica annua risulta ridotta del 28% rispetto al caso ottimale. Nel caso con rotazione del modulo di -45° la riduzione è del 20%. Dunque per la Sala Studio, tra le due configurazioni reali, la situazione ottimale risulta quella con rotazione del modulo di -45° e dunque esposizione dei moduli a Sud.

In Tabella 6.24 è riportata la riduzione percentuale della produzione elettrica mensile di ciascun caso reale rispetto al caso ideale.

Tabella 6.24: Riduzione mensile e annuale [%] della generazione fotovoltaica rispetto al caso senza ostacoli – Sala Studio

Riduzione della produzione fotovoltaica [%]		
	Caso 2 allineato	Caso 2 non allineato
Gennaio	49	38
Febbraio	49	40
Marzo	36	27
Aprile	26	18
Maggio	18	12
Giugno	14	9
Luglio	15	9
Agosto	20	13
Settembre	31	22
Ottobre	43	33
Novembre	51	41
Dicembre	48	37
Annuale	28	20

Nella Figura 6.61 è mostrata la produzione elettrica mensile dei tre sotto casi. È possibile osservare come per i mesi di Gennaio, Febbraio, Novembre e Dicembre, nel caso allineato, si verifichi una riduzione del 50% della produzione rispetto al caso ideale. Questa riduzione è minore nel caso invece non allineato, ma comunque significativa.

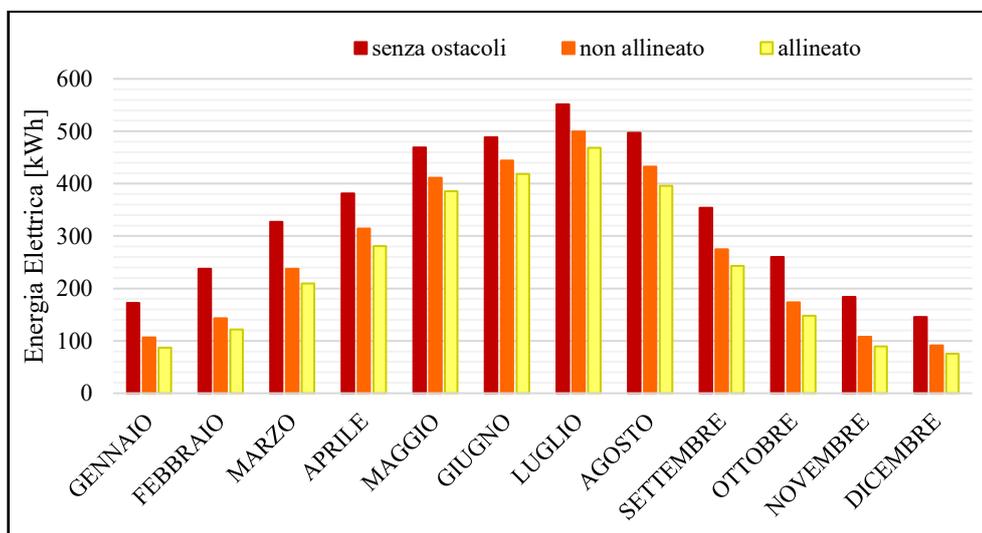


Figura 6.61: Confronto generazione fotovoltaica mensile [kWh] per i tre casi - Sala Studio

Per la Sala Riunioni i consumi elettrici totali annuali sono pari a 1080 kWh per il caso senza ostacoli, a 1104 kWh per il caso allineato e a 1128 kWh per il caso non allineato. Nel caso allineato la Sala Riunioni ha un'esposizione delle facciate verso Sud-Est, Sud-Ovest e Nord-Est e dunque in inverno necessita di un minore fabbisogno termico per riscaldamento rispetto al caso non allineato, che ha le facciate esposte verso Sud, Nord ed Est. In Estate la situazione si ribalta.

Nel caso senza ostacoli gli apporti solari hanno un'influenza notevole sui fabbisogni del modulo abitativo: nei mesi invernali il fabbisogno termico per riscaldamento è il minore tra gli altri due casi, in estate è invece il maggiore. Questo vale sia per la Sala Studio che per la Sala Riunioni.

Per quanto riguarda la Sala studio, i consumi elettrici totali annuali sono pari a 1727 kWh per il caso senza ostacoli, a 1746 kWh per il caso allineato e a 1685 kWh per il caso non allineato. Il caso allineato presenta i fabbisogni termici più alti nel periodo di riscaldamento e leggermente minori nel periodo di raffrescamento in quanto le facciate della Sala studio hanno un'esposizione Nord-ovest, Nord-est e Sud-ovest. Ruotando l'edificio di -45° rispetto al caso allineato, la situazione migliora in quanto i consumi elettrici diminuiscono nel periodo di riscaldamento e sono equiparabili a quelli del caso allineato nel periodo di raffrescamento. La situazione più favorevole è dunque quella del caso non allineato perché, con la rotazione dell'edificio, si aumenta la quota di apporti di calore solari, grazie a un'esposizione delle pareti verso il Sud pieno, Est e Nord.

In Figura 6.62 e Figura 6.63 sono mostrati i consumi elettrici mensili per i due ambienti.

Infine, nella Tabella 6.25 è riportato un riassunto dei risultati ottenuti, riguardanti la produzione elettrica, i consumi elettrici, l'autoproduzione e l'autoconsumo di entrambi gli ambienti per i tre sotto casi.

In Tabella 6.26 sono invece riportati la produzione elettrica totale e i consumi elettrici totali come somma dei contributi dei due ambienti.

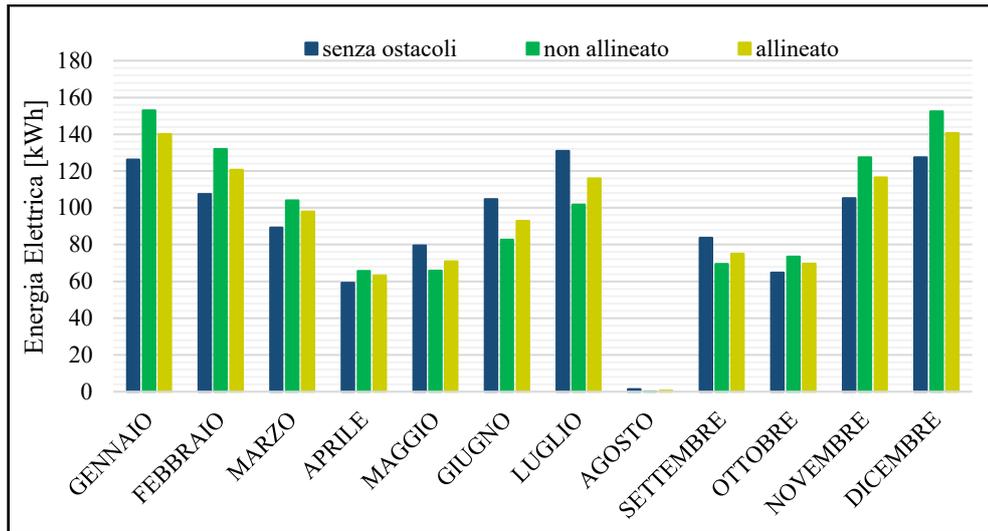


Figura 6.62: Confronto consumi elettrici mensili [kWh] per i tre casi - Sala Riunioni

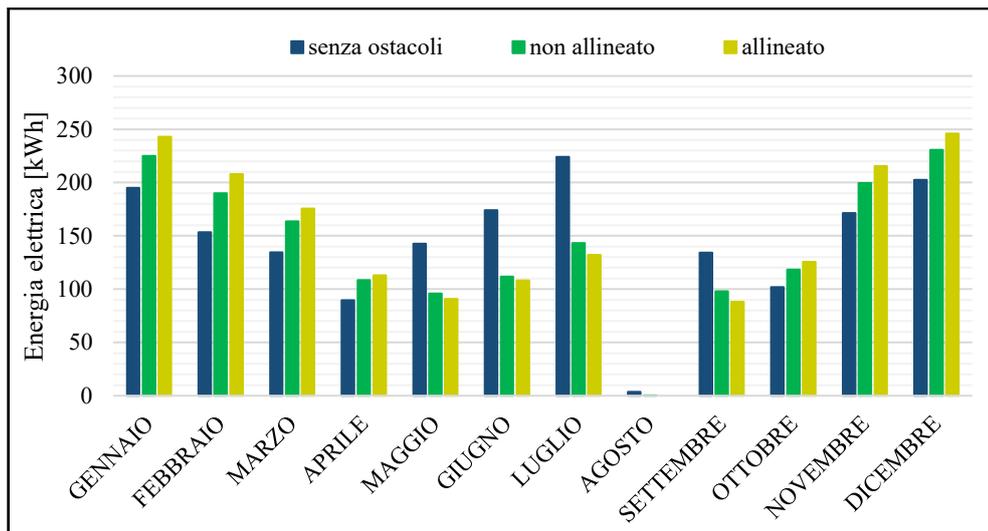


Figura 6.63: Confronto consumi elettrici mensili [kWh] per i tre casi - Sala Studio

Tabella 6.25: Tabella riassuntiva per i tre casi - Sala Studio e Sala Riunioni

	Sala Riunioni			Sala Studio		
	Caso 2 senza ostacoli	Caso 2 allineato	Caso 2 non allineato	Caso 2 senza ostacoli	Caso 2 allineato	Caso 2 non allineato
E_c [kWh]	1080	1104	1128	1727	1746	1685
E_{FV} [kWh]	3598	2936	2666	4067	2924	3237
AC [%]	19	20	20	30	31	29
AP [%]	64	52	48	71	52	55

Tabella 6.26: Generazione e consumo elettrico annuali totali [kWh] della Sala Studio e Sala Riunioni

	Caso 2 senza ostacoli	Caso 2 allineato	Caso 2 non allineato
E_{FV} [kWh]	7665	5860	5902
E_c [kWh]	2807	2850	2813

Capitolo 7

7 Conclusioni

Scopo di questo lavoro è stata l'analisi dei carichi termici ed elettrici degli ambienti Sala Studio e Sala Riunioni in cui si è ipotizzato di suddividere il modulo abitativo prefabbricato *eco>Home*. È stata inoltre analizzata la generazione dei moduli fotovoltaici posti sulla copertura e che alimentano separatamente ciascun ambiente. Quelli relativi alla Sala Riunioni, per una potenza totale pari a 3,6 kW, sono esposti in maniera tale da massimizzare la produzione nelle ore del mattino e del pomeriggio, coerentemente con le ore di utilizzo del locale. Quelli invece relativi alla Sala Studio, per una potenza totale pari a quelli della Sala Riunioni, sono orientati in modo da massimizzare la produzione durante il giorno, quando l'ambiente è in funzione.

Si sono analizzati in tutto quattro casi, ossia il Caso 1 e tre casi differenti del Caso 2 più generale. Questo ha permesso di studiare in dettaglio il comportamento termico ed elettrico del modulo, in funzione delle diverse configurazioni.

Il software *SketchUp* con Plug-in *Open Studio* si è rivelato utile per una preliminare definizione del modulo abitativo, permettendo la sua modellazione 3D e la considerazione degli ostacoli circostanti e del sistema fotovoltaico.

In seguito, il software *EnergyPlus* ha permesso l'acquisizione del modello precedentemente definito e l'inserimento di tutte le caratteristiche necessarie per effettuare un'analisi termo-energetica.

Per il Caso 1, che rappresenta il caso di massimo utilizzo dei due locali, si sono determinati il carico massimo termico e frigorifero, ottenendo rispettivamente circa 4-5 kW_t e 2-3 kW_f, per ciascun ambiente. In seguito sono stati determinati i fabbisogni termici per riscaldamento e raffrescamento per tutti e quattro i casi.

Successivamente, utilizzando i valori di radiazione solare incidente sui moduli fotovoltaici ottenuti tramite le simulazioni su *EnergyPlus*, si è proceduto con la seconda parte del lavoro, relativa all'analisi dei consumi elettrici e della generazione fotovoltaica. Tale studio è stato condotto facendo riferimento ad un utilizzo del modulo abitativo più contenuto e realizzabile rispetto al Caso 1, ossia in riferimento al Caso 2.

È stato di interesse analizzare come la presenza degli ostacoli influenzasse la produzione fotovoltaica, i consumi termici della pompa di calore e i consumi elettrici, rispetto al caso ideale senza gli ostacoli. Ciò che si è notato, è che la presenza dell'edificio della mensa, con altezza pari a circa 13 metri, e degli alberi, porta a un aumento, seppure trascurabile su scala annuale, dei consumi, a causa della riduzione degli apporti di calore solari. La penalizzazione della generazione fotovoltaica è rilevante. In particolare, nel caso della

Sala Studio, la riduzione della produzione fotovoltaica raggiunge il 50% nei mesi invernali, quando il sole risulta più basso e la presenza degli ostacoli si fa sentire maggiormente.

Inoltre, a parità di ostacoli presenti, il Caso 2 con orientamento del modulo secondo le direzioni dei punti cardinali, porta, rispetto al Caso 2 allineato, a una variazione dei consumi e della generazione fotovoltaica differente per Sala Studio e Sala Riunioni. Per quanto riguarda la generazione fotovoltaica della Sala Riunioni, il caso con modulo abitativo allineato con gli edifici circostanti – ossia moduli fotovoltaici esposti a Sud-est e Nord-ovest – risulta quello ottimale. Per la Sala Studio, il caso dell'edificio orientato secondo i punti cardinali – ossia moduli fotovoltaici esposti a Sud – risulta, come prevedibile, il caso ottimale. Per la scelta della configurazione finale, si deve dunque raggiungere un compromesso che comporta la penalizzazione di un ambiente piuttosto che l'altro.

Per tutti e tre i sotto-casi, i consumi elettrici non variano significativamente, attestandosi sui 1100 kWh per la Sala Riunioni e sui 1700 kWh per la Sala Studio. Per la riduzione del fabbisogno termico e il raggiungimento dei requisiti di NZEB sarebbe necessario rivedere tutte le stratigrafie, migliorando la copertura dei consumi e l'autosufficienza del modulo abitativo.

Per entrambi gli ambienti, nei mesi estivi, si nota un forte divario tra produzione elettrica e consumi, determinando un grave spreco di energia. Infatti, l'autosufficienza raggiunge valori pari a circa il 90% mentre l'autoconsumo è solo del 20-30%, a dimostrazione del fatto che l'elevata energia elettrica prodotta viene utilizzata in maniera esigua. Per contro, nei mesi invernali la produzione fotovoltaica risulta troppo bassa per coprire i consumi elettrici, registrando un autoconsumo più elevato e un'autosufficienza solo del 30%. Si può dunque pensare a un aumento dell'inclinazione dei moduli fotovoltaici, rispetto all'inclinazione originale, pari a circa 25°. Inclinando i moduli di un angolo compreso tra i 30° e 50° si incrementerebbe dunque la produzione fotovoltaica invernale, quando il sole risulta più basso, consentendo di aumentare la quota di autoproduzione o autosufficienza. La produzione estiva risulterebbe penalizzata, ma questo porterebbe a una riduzione degli sprechi energetici.

8 Bibliografia

- [1] A. Capozzoli, «Il calcolo del fabbisogno energetico all'edificio per il riscaldamento e raffrescamento - Il bilancio energetico del sistema edificio-impianto,» *Corso di Laurea in Ingegneria Energetica*, A.A. 2017-2018.
- [2] E. Fabrizio e V. Corrado, *Fondamenti di termofisica dell'edificio e climatizzazione*, CLUT, 2012.
- [3] Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio, «DIRETTIVA 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione.,» 2009.
- [4] Rossato Group, «www.rossatogroup.com/prodotti/pompe-di-calore.html,» 2018. [Online].
- [5] CO.AER, Associazione Costruttori di Apparecchiature ed Impianti per la climatizzazione e le pompe di calore, «Pompe di calore per la climatizzazione invernale ed estiva,» *QualEnergia*, 2012.
- [6] V. Verda, «Heat Pumps and ORC,» *Complementi di Energetica, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare*, A.A. 2015-2016.
- [7] C. Europea, «Regolamento delegato (UE) n. 626/2011 della Commissione, del 4 maggio 2011 , che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo d'energia dei condizionatori d'aria,» Maggio 2011. [Online].
- [8] FRIGOMAR - exclusive marine refrigeration and air conditioning system, «www.frigomar.com,» [Online].
- [9] S. S. Berges, «Solar Photovoltaics,» *UPC - ETSEIB - Barcelona School of Industrial Engineering*, A.A. 2016-2017.
- [10] F. Spertino, «Conversione fotovoltaica dell'energia (dispense),» 2016.
- [11] G. Chicco, «Distribuzione dell'energia elettrica,» *Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica*, A.A. 2017-2018.
- [12] Servizio Elettrico Nazionale, «www.servizioelettriconazionale.it,» [Online].
- [13] A. Brambilla, G. Salvalai, M. Imperadori e M. M. Sesana, «Nearly Zero energy building renovation: From energy efficiency to environmental efficiency, a pilot case study,» *Energy & Buildings*, pp. 271-283, 2018.

- [14] P. Ricci, «La riconverisione energetica degli edifici in Italia - Progetto Europeo ZEMEDS,» Settembre 2015.
- [15] Buildings Performance Institute Europe, «A country by country review of the energy performance of buildings,» 2011.
- [16] D. Reina e S. Vianello, GreenWebEconomics La nuova frontiera, Milano: Egea, 2011.
- [17] Ilsole24ore, «<http://www.ediliziaeterritorio.ilsole24ore.com>,» [Online].
- [18] IT House, «<http://tkithouse.com/ithouse/>,» [Online].
- [19] Curbed, «<https://www.curbed.com/2017/7/5/15922464/kodasema-koda-tiny-house-cost>,» [Online].
- [20] Domus, «https://www.domusweb.it/it/architettura/2014/06/06/casa_gg.html,» [Online].
- [21] ecoHome, «www.eco-home.it,» [Online].
- [22] A. Spinelli, «NaturWall©: multifunctional wood façade in existent building refurbishment,» in *La Ricerca (Industriale) nella Produzione Edilizia: risultati ed orizzonti*, Milano, 18-19 Ottobre 2012.
- [23] G. Callegari, L. Bianco, V. Serra e A. Spinelli, «Timber solar facade: A responsive façade for the refurbishment of existing buildings,» in *10th Conference on Advanced Building Skins*, Munich, 2015.
- [24] G. Callegari, L. Bianco, A. Spinelli, V. Serra e S. Fantucci, «NATURWALL© - A solar timber façade system for building refurbishment: optimization process through in field measurements,» *Energy Procedia*, pp. 291-296, 2015.
- [25] A. Fanchiotti e E. Carnielo, «Impatto di tecnologie Cool Roof sulle prestazioni energetiche degli edifici. Caso studio,» *ENEA - Report ricerca di Sistema elettrico*, 2010.
- [26] Wikipedia, «<https://en.wikipedia.org/wiki/SketchUp>,» [Online].
- [27] ENEA, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico, Ricerca Sistema Elettrico, «Metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento degli edifici,» Marzo 2009. [Online].
- [28] U.S. Department of Energy, «Input Output Reference,» *EnergyPlus Version 8.8.0 Documentation*, Settembre 2017.

[29] Bisegna, Gugliermetti, Barbalace e Monti, «Confronto tra Software illuminotecnici
- Report Ricerca Sistema Elettrico,» Enea, 2010.