

Lavoro di maturità 2010

Studio del profilo energetico di un edificio: il caso del Liceo Lugano 2



Michele Morandini & Raffaele Colombi

Docente: Nicolas Cretton
Liceo Lugano 2, Savosa

Indice

<u>1. Introduzione</u>	p. 3
<u>2. Energie rinnovabili e alternative</u>	p. 4
2.1 Definizione di energie rinnovabili	p. 4
2.2 Definizione di energie alternative	p. 4
2.3 Geotermia	p. 6
2.3.1 Definizione	p. 6
2.3.2 Applicazioni	p. 7
2.3.3 Funzionamento e tipologie di impianto	p. 7
2.3.4 Vantaggi e svantaggi	p. 12
2.4 Solare termico	p. 13
2.4.1 Definizione	p. 13
2.4.2 Funzionamento e tipologie di impianto	p. 13
2.4.3 Tipologie di collettori	p. 15
2.4.4 Vantaggi e svantaggi	p. 16
2.5 Solare fotovoltaico	p. 16
2.5.1 Definizione	p. 16
2.5.2 Tipologie di moduli	p. 16
2.5.3 Vantaggi e svantaggi	p. 17
<u>Capitolo 3. Conduzione e convezione termica, coefficiente U</u>	p.20
3.1 Calore	p.20
3.2 Conduzione termica	p.20
3.3 Convezione termica	p. 21
3.4 Il coefficiente U – Pareti	p. 22
3.5 Il coefficiente U – Finestre	p. 24
3.6 Esempio di calcolo di coefficiente U	p. 25
3.7 L'energia dispersa da un elemento costruttivo	p. 26
3.8 Esempio di calcolo di energia dispersa: vetrata delle palestre	p. 27

4. Isolazione termica del liceo	p. 28
4.1 Dispendio energetico: superfici di scambio	p. 30
4.2 Dispendio energetico: finestre	p. 36
4.3 Dispendio energetico: stabile delle palestre	p. 37
4.4 Fotografie dell'edificio del liceo	p. 42
5. Studio sul consumo di acqua calda sanitaria	p. 45
5.1 Stima del consumo	p. 45
5.2 Progettazione e dimensionamento dell'impianto	p. 46
5.3 Consumo effettivo di gas: confronto con le stime	p. 46
5.4 Consumo estivo di gas	p. 47
5.5 Confronto dei consumi con un'abitazione monofamiliare	p. 48
6. Conclusioni	p. 50
Bibliografia telematica	p. 52
Ringraziamenti	p. 56
Appendice: posizione del Sole, potenza del flusso solare ed energia erogata dal pannello	p.57
1. Posizione del Sole	p. 57
2. Flusso solare sul pannello PV	p. 58
3. Energia erogata dal pannello	p. 59
4. Impianti per case monofamiliari: confronti e valutazioni	p. 62

Capitolo 1. Introduzione

Le energie rinnovabili sono un tema sempre più attuale. Sempre più spesso vediamo dibattiti politici in cui si discute se questo o quel provvedimento sono migliori per uno sviluppo sostenibile e rispettoso dell'ambiente. Tuttavia è anche chiaro come troppe persone non sono attente, o non vogliono esserlo, e sensibilizzate a queste tematiche. Per ciò uno dei motivi principali che ci hanno spinto a realizzare questo lavoro è quello di accrescere le nostre conoscenze in questo ambito, in modo da renderci in grado di affrontare problemi che si fanno sempre più frequenti nella vita di tutti i giorni, come per esempio la costruzione di una casa ecologica. A questo motivo si allaccia quello della sensibilizzazione: come già detto troppe persone non hanno una visione chiara e oggettiva dei vantaggi e degli svantaggi delle energie rinnovabili, di come esse funzionino, dei principi che stanno alla base delle loro applicazioni, ecc. L'installazione di un impianto solare termico include grossi vantaggi ambientali (in termini di emissioni di CO₂), benefici che si riflettono sull'economia locale e una minore dipendenza dai paesi esportatori di combustibili fossili. Come applicazione concreta abbiamo studiato il caso del nostro liceo.

Nel capitolo 2 parleremo di energie rinnovabili: discuteremo soprattutto delle loro applicazioni e in particolare di quelle che oggi sono maggiormente utilizzate, fornendo dati sul rendimento, i costi, i requisiti necessari all'installazione, il loro funzionamento e terminando con un elenco dei maggiori vantaggi e svantaggi che esse comportano. Nel capitolo 3 spiegheremo la teoria che sta alla base dei nostri calcoli, necessari per stabilire l'impatto ambientale di un edificio. Nel capitolo 4, applicheremo le formule nel calcolo dei vari coefficienti e consumi del nostro liceo, paragonandoli ad altre situazioni, assumendo un intervento di risanamento dell'edificio. Nel capitolo 5 parleremo del consumo di gas e di acqua per il riscaldamento e sanitaria e stimeremo un eventuale risparmio a seguito di un intervento. Nel capitolo 6 trarremo le conclusioni che ci permetteranno di giudicare nel complesso l'efficienza energetica del nostro liceo e ci permetteranno di proporre un'idea per diminuire l'impatto ambientale dell'edificio e il suo eventuale costo. Nell'appendice calcoleremo, tramite un programma, l'andamento della posizione del Sole e la produzione di energia elettrica tramite un pannello fotovoltaico relazionata a essa.

Capitolo 2. Energie rinnovabili e alternative

2.1 Definizione di energie rinnovabili

Si tratta di energie che non si esauriscono o che si ricostituiscono in tempi utili per l'uomo. Ciò significa che il rapporto tra il tempo di riserva della fonte di energia e quello di un essere umano è molto grande. Per comprendere questo criterio portiamo due esempi: quello del Sole e quello del petrolio. Il tempo di riserva del Sole è di circa 4 miliardi di anni. Di conseguenza il rapporto fra vita del Sole e vita di un uomo è: $4 \cdot 10^9 / 100 = 4 \cdot 10^7$. Il risultato ci conferma quindi che il Sole è un'energia rinnovabile. Al contrario il petrolio non lo è dal momento che il rapporto fra tempo di vita del petrolio, inteso come petrolio economicamente favorevole (stimato a 40 anni dalla BP), e tempo di vita dell'essere umano è: $40/100 = 0,4$. Un altro criterio per comprendere se una risorsa è rinnovabile o meno è il seguente: il loro utilizzo non deve danneggiare o consumare le risorse naturali del pianeta, che rimangono disponibili per le generazioni future.

In base a questi criteri le energie da considerarsi rinnovabili sono il mare, l'idroelettricità, il vento, il calore della Terra e il Sole. Parimenti le energie non rinnovabili sono: i fluidi fossili (petrolio, carbone, gas naturali) e diversi isotopi radioattivi impiegati nella fissione nucleare. I primi tre non fanno parte del novero delle energie rinnovabili a causa del loro breve periodo di riserva. Gli ultimi non sono invece rinnovabili, non tanto a causa della loro esauribilità in tempi umani (l'uranio è più raro in natura del petrolio ma un suo kg produce, in un reattore medio, 500'000 MJ, mentre 1 kg di petrolio produce 53 MJ) ma soprattutto a causa delle loro scorie radioattive, le quali danneggiano le risorse del pianeta.

La legna è invece un caso particolare dal momento che può essere sia rinnovabile che non. La sua rinnovabilità dipende infatti dall'uso che ne fa l'uomo. Un esempio può essere il disboscamento che sta progressivamente decimando la foresta amazzonica: in questo caso l'uso che si fa della legna non è rinnovabile in quanto gli alberi abbattuti non vengono rimpiazzati da nuovi alberi. Al contrario si può parlare della legna come risorsa rinnovabile se le piante abbattute vengono sostituite.

2.2 Definizione di energie alternative

Sono le energie prodotte usando metodi diversi dall'impiego di combustibili fossili. Ne risulta una quasi totale assenza di emissioni di CO₂ o altri gas serra (p. es.: CH₄).

Le energie alternative non vanno confuse con quelle rinnovabili: un esempio di energia alternativa che non è però rinnovabile è quella scaturita dalla fissione nucleare: questo processo non rilascia anidride carbonica perché non brucia combustibili fossili, tuttavia gli isotopi radioattivi necessari sono presenti in quantità limitata sul nostro pianeta. Il problema maggiore che riguarda la fissione nucleare è però la produzione di materiale radioattivo che dev'essere stoccato in modo da non essere nocivo all'uomo.

Si cominciò a parlare di questi tipi di energie a partire dagli anni '70, a causa delle crisi petrolifere. A seguito di questi avvenimenti si iniziò ad investire risorse umane ed economiche nella ricerca di fonti di energia alternative al petrolio. Oggi, dato il crescente fabbisogno di energia da parte dell'umanità e data la consapevolezza che i giacimenti di combustibili fossili sono sul punto di esaurirsi e la loro combustione è responsabile dell'effetto serra e quindi dell'inquinamento del pianeta, gli sforzi si fanno sempre più insistenti e danno risultati sempre più incoraggianti. A questi motivi si aggiunge anche quello di cercare, nella maniera più efficiente, di uscire da quella

dipendenza energetica che da ormai troppo tempo ci lega indissolubilmente a paesi come Iraq, Arabia Saudita, Iran, Libia e Russia: i primi quattro per i loro giacimenti petroliferi, mentre il quinto per la sua grande disponibilità di gas naturale. Ovviamente a queste cinque nazioni se ne aggiungono molte altre e quello che si viene a creare è un problema geopolitico, dal momento che le nazioni che necessitano di queste materie prime non dispongono di giacimenti sufficienti a coprire i loro fabbisogni energetici o non ne dispongono affatto e sono quindi costrette a comprarle da paesi che hanno una grande disponibilità di queste materie. La soluzione per uscire da questo “giogo” sono le energie rinnovabili ed è per questo motivo che i paesi più avanzati continuano ad investire in questo campo, anche se per certi versi continuano a mantenere la loro dipendenza energetica poiché gli interessi in gioco sono troppo grandi per essere trascurati.

Noi prenderemo in considerazione solo 3 tipi di fonti rinnovabili e alternative: geotermia, solare termico e fotovoltaico. Questa selezione è dovuta dal fatto che questi tre sistemi sono quelli più facilmente usati negli edifici attuali e che quindi più si addicono al nostro edificio scolastico.

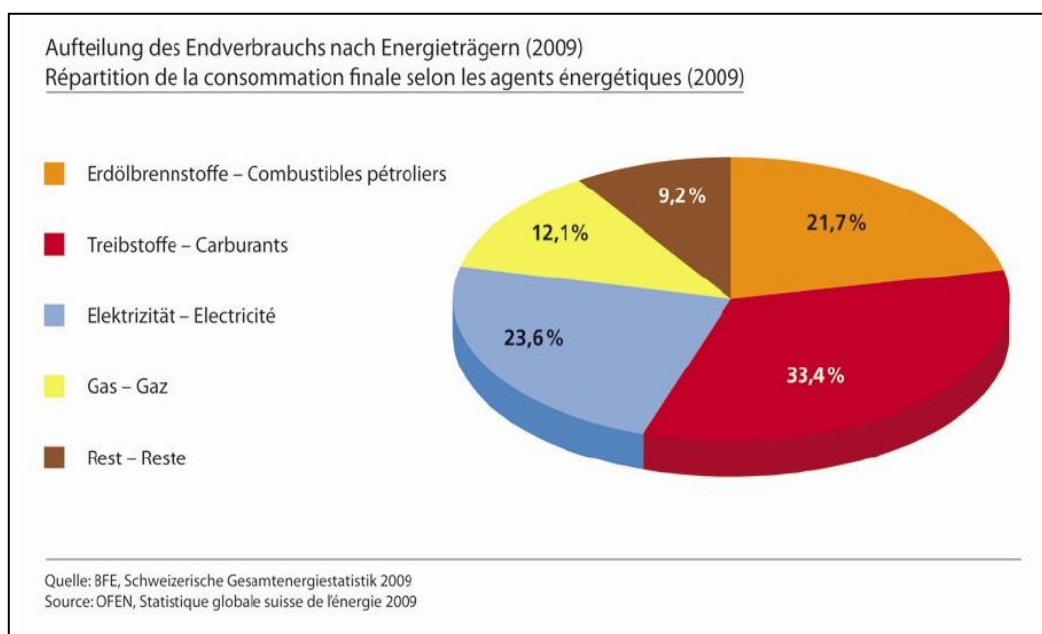


Figura 2.1: ripartizione del consumo di energia in Svizzera, suddiviso in base ai vettori energetici (2009). Fonte: Ufficio Federale di Statistica.

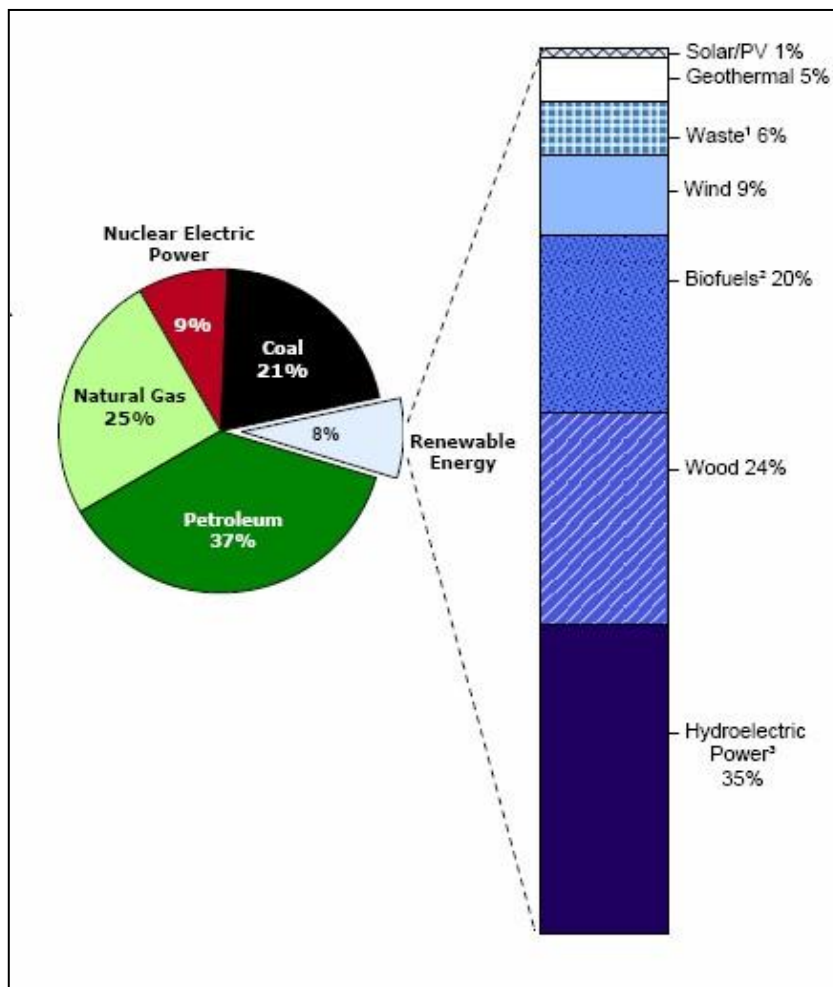


Figura 2.2: ripartizione percentuale del consumo mondiale di energia nel 2009, secondo i vettori energetici. Fonte: U.S. Energy Information Administration.

2.3 Geotermia

2.3.1 Definizione

La geotermia è l'energia proveniente da fonti di calore del sottosuolo: questo calore è prodotto dal decadimento radioattivo di alcuni elementi presenti in modo naturale nel terreno, quali uranio o potassio oppure dalla presenza di una falda termale che scalda l'ambiente circostante; il calore del magma sotto la crosta terrestre non influisce su questo calore in quanto lo strato di roccia è troppo spesso per permettere uno scambio di energia.

Il calore prodotto causa una variazione di temperatura nel sottosuolo pari a 3 °C ogni 100 m di profondità. Bisogna però far notare che nei primi 15 m la temperatura varia in base alla meteorologia dell'atmosfera soprastante: queste oscillazioni sono dovute alle varie infiltrazioni presenti legate alla porosità del terreno. L'aumento di temperatura nel sottosuolo, direttamente proporzionale alla profondità, viene sfruttato dall'uomo per la produzione di energia termica utile al riscaldamento di uno stabile.

2.3.2 Applicazioni

Il metodo più largamente diffuso è quello della geotermia a bassa entalpia, che sfrutta il sottosuolo come serbatoio di calore. L'impianto geotermico preleva calore dal suolo tramite un fluido che circola a una temperatura minore rispetto all'ambiente circostante. Ovviamente la quantità di calore varia a seconda della differenza di temperatura fra fluido e terreno, della conducibilità termica dello stesso, della superficie di scambio e della portata e velocità del fluido in circolazione.

2.3.3 Funzionamento e tipologie di impianto

Il prelievo avviene tramite le pompe di calore, le quali funzionano in modo esattamente opposto al frigorifero, e le sonde geotermiche, che permettono al fluido di arrivare fino a profondità considerevoli.

Normalmente le sonde sono costituite da uno o due circuiti chiusi inseriti in una perforazione di circa 140 mm di diametro e di una profondità compresa fra 50 e 200 m. Lo spazio fra foro e tubazione è spesso riempito con miscele di cemento al fine di garantire impermeabilità e conducibilità.

La pompa di calore invece permette di portare il calore da un posto più freddo a uno più caldo. Nei frigoriferi o nei congelatori lo scopo è lo stesso ma i serbatoi sono invertiti, dal momento che l'interno è il serbatoio freddo, mentre nella pompa di calore la casa, cioè l'interno, è il serbatoio caldo. Si fornisce calore all'abitazione tramite una certa quota di energia elettrica (p. es.: 1 kWh) sommata a un contributo "gratuito" del terreno (p. es.: 3-4 kWh). Il rapporto fra energia fornita alla casa (somma di energia elettrica e calore prelevato) e impiego elettrico ci permette di calcolare il rendimento della pompa (COP) con la seguente formula:

$$COP = \frac{Q_{el} + Q_{term.}}{Q_{el}} = 1 + \frac{Q_{term.}}{Q_{el}} = 1 + \frac{3}{1} = 4,$$

dove Q_{el} è l'energia elettrica utilizzata dalla pompa di calore per compiere lavoro e $Q_{term.}$ è l'energia termica estratta dalla terra.

Il vantaggio di questo sistema deriva dal fatto che si paga solamente la prima quantità di energia immessa, mentre la seconda è gratuita. Il vantaggio è confermato dal fatto che la seconda quantità di energia è maggiore, e di molto, alla prima (circa il 75 % dell'energia prodotta viene prelevata dal terreno). Abbiamo quindi un immediato guadagno considerevole in termini economici.

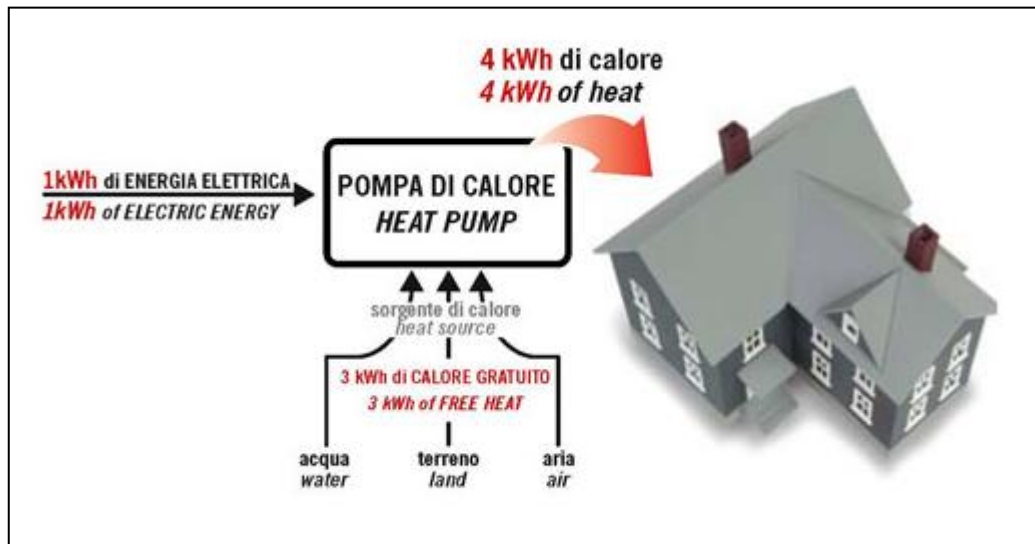


Figura 2.3: schematizzazione dell'apporto di energia dovuto alla pompa di calore.

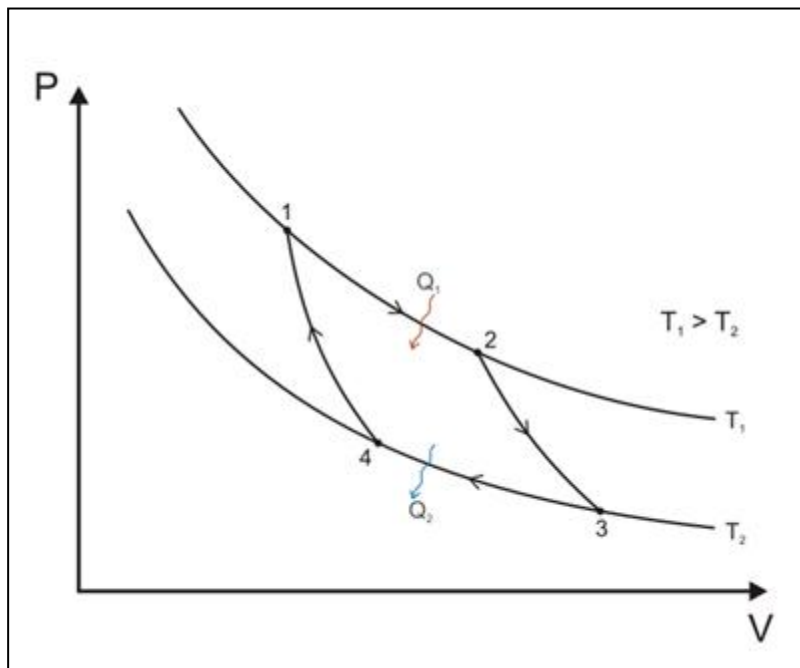


Figura 2.4: ciclo termodinamico della pompa di calore. P è la pressione, V è il volume, Q_1 è l'energia del serbatoio caldo, Q_2 quella di quello freddo, T_1 e T_2 sono le temperature dei serbatoi.

Il guadagno di calore è permesso dal ciclo termodinamico messo in atto dalla pompa di calore, ovvero il ciclo frigorifero (contrario per esempio al ciclo termodinamico presente nei motori a scoppio), il quale è composto da 4 trasformazioni, 2 delle quali adiabatiche (senza scambi di calore con l'esterno, trasformazioni 1 e 3) e 2 isoterme (senza variazione di temperatura, trasformazioni 2 e 4). Il processo inizia attraverso una compressione: il lavoro, fornito sotto forma di energia elettrica, serve a comprimere il fluido vettore. La compressione è la prima trasformazione ed è adiabatica.

Nella seconda fase il fluido passa in un evaporatore: questo passaggio permette di scaldare il liquido con energia termica prelevata dall'esterno e di farlo appunto evaporare. In questo caso la trasformazione è di tipo isoterma: la temperatura non varia, aumenta il volume e la pressione diminuisce.

Il terzo passaggio consiste in una valvola di sfogo, che permette di ridurre il volume del fluido, che a questo punto è gassoso, senza avere perdite di energia termica verso l'esterno: si tratta della seconda trasformazione adiabatica.

Nell'ultima fase il gas passa in un condensatore che raffredda il liquido e indirizza l'energia prelevata verso l'interno, permettendo così di scaldare l'edificio. Come è già stato detto prima vediamo che l'unico apporto di energia che deve essere pagato è quello fornito dal compressore, che costituisce però solo $\frac{1}{4}$ dell'energia termica immessa nell'edificio.

Il funzionamento dell'impianto si divide in funzionamento invernale ed estivo: in quello invernale (modalità di riscaldamento) il fluido che scende ha una temperatura inferiore a quella nel terreno e risale dopo essere stato riscaldato per conduzione dallo stesso. In seguito la pompa di calore trasferisce l'energia dal fluido all'impianto di riscaldamento. In estate invece l'impianto funziona in due modi: *active cooling* e *natural cooling*. Entrambi servono a rinfrescare la casa nei mesi più caldi dell'anno. Nel primo la pompa funziona in modo opposto al riscaldamento: infatti il fluido scende nel terreno ad una temperatura maggiore e cede calore. Da notare che questo raffrescamento attivo è da abbinare alla deumidificazione.

Nel *natural cooling* si fa semplicemente circolare l'acqua di ritorno delle sonde all'interno dei pannelli radianti (serpentine o termosifoni). Ovviamente in questo caso il fluido delle sonde deve essere costituito solo da acqua e bisogna predisporre il *by-pass* della pompa di calore (la pompa di calore viene esclusa dal circuito). Questo sistema è più ecologico ed economico rispetto al raffrescamento attivo.

Bisogna far notare che nel *natural cooling* l'acqua che passa nelle serpentine è la stessa che scende nelle sonde geotermiche. Ovviamente questo sistema è più "semplice" rispetto a quello dell'*active cooling*, dal momento che non bisogna trasferire il calore dal fluido all'acqua ma semplicemente si fa passare l'acqua dalle sonde alle serpentine. Tuttavia il percorso che l'acqua compie si allunga e quindi le perdite lungo il tragitto saranno maggiori, abbassando quindi il rendimento dell'impianto.

Principalmente ci sono tre modalità di impianto geotermico: l'impianto a sonde verticali, l'impianto a sonde orizzontali e quello ad acqua di falda.

Il primo garantisce un elevato rendimento ma ha costi molto elevati (fra perforazione, impianti e installazione si arriva ai 45'000 fr., fonte geothermie.ch), in quanto la profondità di carotaggio si situa intorno ai 100 m, il che però permette di usare poco spazio intorno all'edificio.

Il sistema orizzontale invece è meno costoso (profondità di soli 5 m con costi che si aggirano intorno ai 24'000 fr.) ma meno efficiente e richiede più spazio intorno alla casa dal momento che le sonde geotermiche sono poste in modo orizzontale e non verticale (è necessaria un'area che corrisponde circa al doppio della superficie che si intende riscaldare). Inoltre nel periodo estivo

non sempre è sicuro l'uso del raffrescamento, cosa che invece è garantita nell'impianto a sonde verticali.

Il terzo necessita di una falda acquifera. La profondità varia quindi in base alla presenza di falde, che però non può sorpassare i 30 metri di profondità. Ha costi elevati (circa 33'000 franchi) mentre il rendimento è praticamente uguale a quello del sistema a sonde verticali. Tuttavia necessita di due pozzi, uno per attingere e uno per reimmettere l'acqua.

Un impianto geotermico è realizzabile in qualsiasi zona per riscaldare ogni edificio. Tuttavia esistono alcuni pre-requisiti preferenziali:

- 1) non devono esistere situazioni geologiche sfavorevoli. Un esempio potrebbe essere un terreno molto roccioso che renderebbe il carotaggio molto difficile.
- 2) gli edifici presi in considerazione devono avere prestazioni energetiche medio-elevate e devono essere utilizzati con frequenza. Infatti è sconsigliato installare un impianto geotermico in una casa di vacanza per il semplice fatto che il recupero dei costi di investimento avverrà in un tempo molto più lungo rispetto a una casa utilizzata ogni giorno. Si hanno maggiori convenienze per quegli edifici che impiegano anche il raffrescamento.
- 3) la distribuzione interna deve avvenire a temperature medio-basse: questo implica installazioni di serpentine e non di termosifoni.

Esiste anche una variante più industriale della geotermia: le centrali geotermiche. Queste utilizzano il flusso di calore sotto forma di vapore acqueo per far muovere turbine che producono energia elettrica. Se la temperatura del vapore non è sufficientemente elevata l'acqua calda viene impiegata per la produzione di calore.

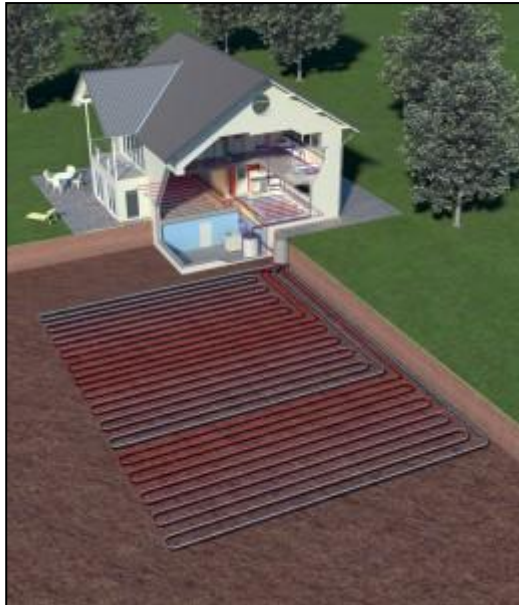


Figura 2.5: impianto geotermico a sonde orizzontali.



Figura 2.6: impianto geotermico ad acqua di falda.



Figura 2.7: impianto geotermico a sonde verticali.

Caratteristiche del sottosuolo	Rendimento [w/m]
sottosuolo asciutto	20
roccia o terreno umido	50
roccia con alta conducibilità	70
ghiaia, sabbia asciutta	<20
ghiaia, sabbia satura	55-65
argilla, limo, umido	30-40
roccia calcarea	45-60
arenaria	55-65
granito	55-70
gneiss	60-70

Figura 2.8: rendimento della sonda geotermica in funzione della tipologia di terreno.

2.3.4 Vantaggi e svantaggi

Il beneficio più diretto che si può trarre dalla geotermia deriva dal punto di vista ecologico: infatti non si immette direttamente CO₂ nell'aria e gli unici impatti sono legati ai consumi di energia elettrica.

Si hanno dei benefici anche dal punto di vista economico, in quanto, nonostante l'investimento iniziale sia notevolmente più alto rispetto a quello di una caldaia (45'000 CHF contro 21'000 CHF), i costi di gestione sono notevolmente più bassi rispetto ai tradizionali impianti a combustione (si va da 500 CHF a 1300 CHF, contro i 2700 CHF necessari per una caldaia). Il costo dell'investimento iniziale (senza incentivi e agevolazioni) viene ammortizzato in 18 anni circa. Nella tabella che segue, creata utilizzando dati pubblicati nel numero di marzo 2011 della rivista "Svizzera Energia", è possibile notare come sia più vantaggioso installare un sistema di riscaldamento a energie rinnovabili piuttosto che uno a combustione di gas o nafta. Questo vantaggio è dovuto ai minori costi d'esercizio e di ammortamento di questi impianti ma anche alla possibile crescita esponenziale dei prezzi del combustibile. Il confronto è stato fatto per una casa monofamiliare di 180 m² di superficie con un fabbisogno termico di 18'000 kWh all'anno. A seconda degli impianti, sono compresi nei costi sonde geotermiche, accumulatori, raccordi, canna fumaria, ecc. I costi energetici tengono conto della tassa sul CO₂ per il gas, che viene quindi a costare 1,08 CHF al m³.

Altri vantaggi si trovano nell'assenza di perdite di gas, in una bassa richiesta di interventi di manutenzione e di locali appositi (necessari per le caldaie) e da ultimo nell'indipendenza dalle reti di fornitori, esclusa quella dell'energia elettrica. D'altro canto, servono condizioni geologiche adatte e permessi amministrativi non sempre facili da ottenere.

Tipo di riscaldamento	Costi d'investimento [CHF]	Costi energetici annuali [CHF/anno]	Costi d'esercizio annuali [CHF/anno]	Costi annuali compresi interessi e ammortamento [CHF/anno]
Riscaldamento a gas	21'000	2086	2714	5043
Riscaldamento a gasolio	23'000	2139	2714	5168
Pompa di calore con sonde geotermiche	45'000	862	987	3882
Pompa di calore con sonde combinate a collettori	55'000	434	559	4166

2.4 Solare termico

2.4.1 Definizione

Un impianto solare termico produce calore sfruttando l'irraggiamento solare (che in Svizzera corrisponde circa a 1000 kWh/m^2 all'anno) convertito in energia termica tramite i pannelli collettori. Il calore ricavato viene accumulato tramite acqua contenuta nei boiler, per essere utilizzato in seguito. Esso non deve essere confuso con il pannello solare fotovoltaico (produzione di energia elettrica).

2.4.2 Funzionamento e tipologie di impianto

Esistono due tipi di impianto: quello a circolazione naturale e quello a circolazione forzata.

Il primo sfrutta la convezione. Infatti il liquido vettore nel pannello solare si riscalda e va verso l'alto. In seguito passa nello scambiatore dell'accumulatore dove rilascia la sua energia all'acqua che verrà poi utilizzata. Dopodiché rientra nel pannello e si riscalda nuovamente.

Questo sistema è molto semplice ed è più economico rispetto all'impianto con circolazione forzata. Questo tipo di circolazione è più sensibile a perdite di calore e per questo l'accumulatore deve essere installato vicino ai pannelli e ad un'altezza maggiore.

La circolazione forzata utilizza invece delle pompe che servono a far circolare il fluido all'interno delle tubature quando il liquido presente nello scambiatore del boiler ha una temperatura minore di quello all'interno dei pannelli o collettori.

In questo impianto non si è obbligati a posizionare i pannelli vicino all'accumulatore: le pompe fanno sì che il fluido vettore scorra più velocemente e non sia vincolato alle leggi della gravità.

Ovviamente quest'installazione ha un costo maggiore rispetto a quella con circolazione naturale.

Vista la loro dipendenza dall'irraggiamento, è consigliabile l'integrazione con un impianto a caldaia o geotermico.

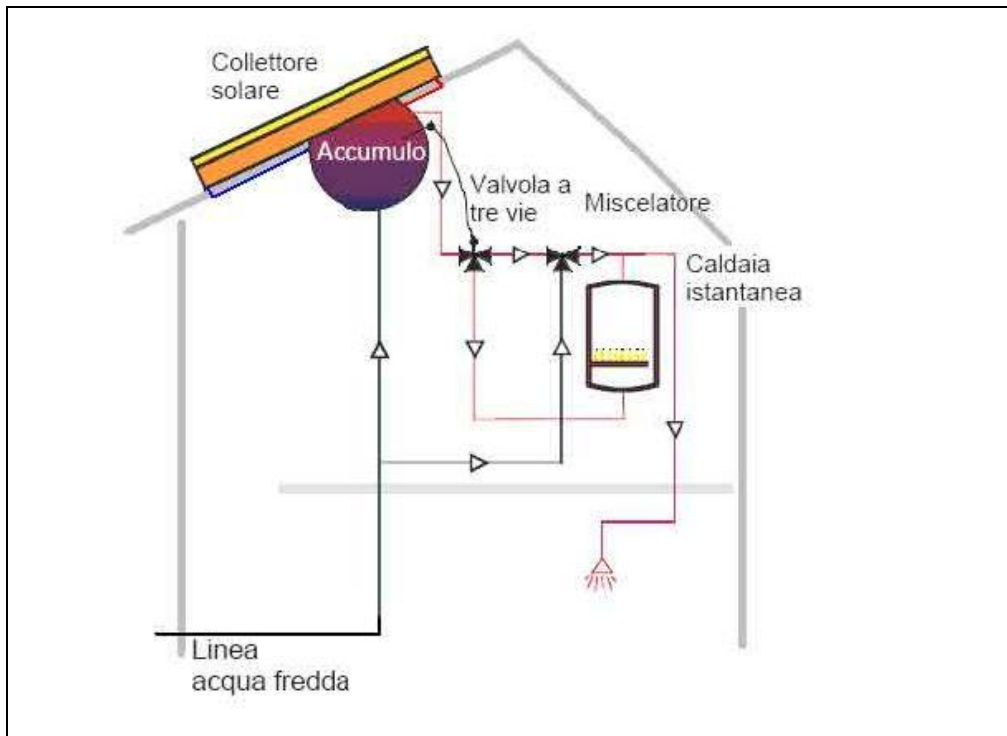


Figura 2.9: impianto solare termico a circolazione naturale.

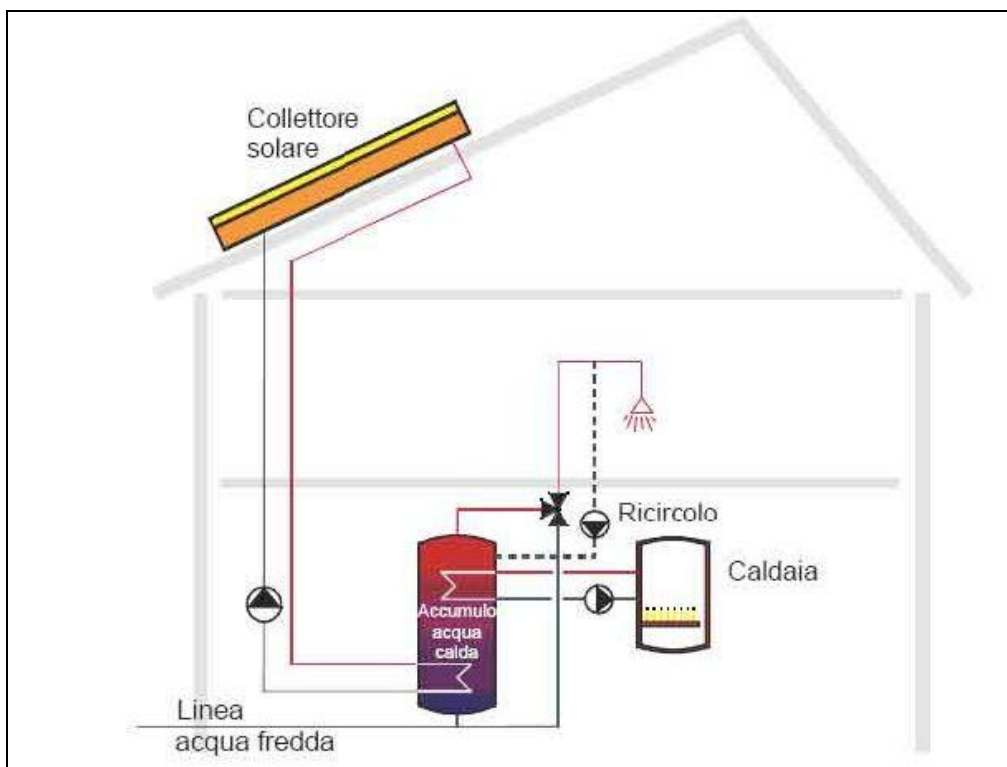


Figura 2.10: impianto solare termico a circolazione forzata.

2.4.3 Tipologie di collettori

Esistono molte tipologie di pannelli solari. Le più importanti sono:

a) Pannelli non vetrati

Si tratta di pannelli privi di vetro protettivo. Essi sono economici e hanno un alto rendimento in condizioni ottimali. L'acqua passa direttamente all'interno dei tubi, dove è riscaldata. Tuttavia essa non riesce a superare una temperatura di 40 °C e quindi questo impianto viene limitato all'uso stagionale per la produzione di acqua sanitaria.



Figura 2.11: impianto di collettori solari non vetrati montato su di un tetto.

b) Pannelli vetrati, ad acqua (selettivi o non selettivi)

I pannelli sono coperti da una lastra di vetro che limita le perdite di calore. Complessivamente il rendimento è più alto dei non-vetrati in quanto sono utilizzabili in condizioni non ottimali. Essi possono essere selettivi o non selettivi: i primi hanno un assorbitore, trattato chimicamente, più ricettivo al calore e sono più efficienti nei periodi meno favorevoli. Nei secondi l'assorbitore è di colore nero.

c) Pannelli vetrati, ad aria (selettivi o non selettivi)

Il vettore non è più liquido ma è semplicemente aria, che circola tra vetro e assorbitore. Come nel caso precedente possono essere selettivi o meno. Questi pannelli sono migliori di quelli ad acqua perché l'uso dell'aria al posto dell'acqua come isolante garantisce meno perdite di calore.

d) Pannelli sottovuoto (tubo a U o *Heat pipe*)

Questa categoria di pannelli è la più efficiente in quanto, tra vetro e assorbitore, abbiamo il vuoto che isola in modo migliore rispetto all'aria o all'acqua.

Questa tipologia si suddivide in tubo a U e *Heat pipe*: il primo contiene un tubo a U in cui circola il fluido vettore che viene scaldato direttamente. La seconda invece contiene due tubi: uno è il normale tubo del liquido, mentre il secondo (sottostante) è fatto in rame e contiene un fluido a bassa pressione che, evaporando va a condensarsi sul primo, cedendogli calore.

2.4.4 Vantaggi e svantaggi

Come nella geotermia, gli impianti a collettori solari non emettono CO₂ e sono indipendenti dalle forniture di carburante. Inoltre sono abbastanza economici (750-100 CHF al pezzo).

L'uso maggiormente diffuso è quello di produrre acqua calda sanitaria e con i collettori si può giungere a coprire fino al 100 % del fabbisogno. Bisogna considerare 1-1,5 m² di pannello ogni 100 l di accumulo in un giorno di sole nel periodo di media-alta efficienza tra aprile e settembre. Un'altra applicazione può essere quella di integrare i collettori solari nel sistema di riscaldamento dell'abitazione (caldaia a gas,...), in modo da ridurre il consumo di combustibili fossili, oppure nel riscaldamento dell'acqua calda sanitaria. Per queste operazioni bisogna tener presente che 1 m² di collettori produce dai 600 ai 700 kWh di energia termica all'anno (in Ticino). Per cui se si vuole sostituire il 60 % della produzione di acqua calda tramite uno scaldabagno elettrico con dei collettori solari, bisognerà fare il seguente calcolo: il consumo annuo di uno scaldabagno elettrico è pari a $8 \cdot 365 = 2920$ kWh, il 60 % è pari a 1752 kWh. Sapendo che 1 m² di pannello produce circa 600 kWh, serviranno 3 m² di pannelli, che verrebbero a costare circa 3100 CHF. Il risparmio annuale è di 345 CHF, per cui l'investimento iniziale verrebbe recuperato in 9 anni circa. È quindi possibile vedere che anche con un investimento esiguo è possibile ricavare dei vantaggi in termini di risparmio economico ma soprattutto d'impatto ambientale. Come svantaggi abbiamo la dipendenza totale dall'irradiazione solare e i problemi di installazione a causa della brutta estetica di questi pannelli.

2.5 Solare fotovoltaico

2.5.1 Definizione

Un impianto solare fotovoltaico sfrutta l'energia solare per produrre energia elettrica tramite l'effetto fotovoltaico.

L'effetto fotovoltaico, studiato per la prima volta da Alexandre Becquerel (1839), consiste nella separazione di un elettrone dell'orbita più esterna dal suo atomo a seguito dell'assorbimento di un fotone particolarmente carico energeticamente. Tramite questo fenomeno fisico si può oggi produrre energia elettrica grazie ai pannelli solari fotovoltaici, detti più semplicemente moduli fotovoltaici.

2.5.2 Tipologie di modulo

Al giorno d'oggi esistono principalmente 2 tipologie di modulo fotovoltaico, entrambe realizzate soprattutto in silicio: il modulo cristallino e quello a film sottile. La differenza sostanziale sta, come dice il nome del secondo, nelle dimensioni. Il primo è infatti più spesso a causa della disposizione omogenea a nido d'ape (wafer) degli atomi di silicio (servono circa 20 g di silicio per ogni Wp). Nel secondo invece gli atomi vengono chimicamente disposti in forma amorfa, disorganizzata. Questa tecnologia impiega quantità bassissime di silicio che rientrano nell'ordine del micron (circa 0,4 g/Wp). L'impiego di meno materiale comporta costi più contenuti: il modulo "classico" in silicio più economico costa 1,55 CHF/Wp¹, mentre il "thin-film" più economico costa circa 1,16 CHF/Wp. Tuttavia, le differenze esistono anche a livello di rendimento, dal momento che nei moduli cristallini il rendimento si aggira intorno al 14 %, mentre in quelli a film sottile si assesta su valori

¹ Wp è il Watt Peak, ovvero la potenza nominale di un modulo in condizioni di illuminazione ottimale.

intorno al 6 %. Oltre a questo dato (relativamente basso), bisogna far notare come un pannello fotovoltaico perda circa l'1 % del suo rendimento iniziale ogni anno².

Nel mercato odierno, i moduli in vendita hanno una superficie che può variare da 0,5 m² a 1,5 m², fino ad arrivare a 2,5 m² per impianti di tipo industriale. La potenza installata di un modulo si situa attorno ai 200 Wp a 32 V, che corrispondono a circa 55 celle. In genere, per raggiungere 1 kWp, oggi si hanno bisogno di 7,2 m² di pannelli, che diventano 5,1 m² se vengono utilizzati i pannelli attualmente più prestanti, il cui rendimento si aggira intorno al 19 %. Secondo i dati forniti sopra il costo di una normale installazione fotovoltaica (1 kW, 7,2 m²) vale circa 5800-7800 CHF per pannelli cristallini e 3200-4500 CHF per pannelli a film sottile. È però importante fare notare come la superficie di "thin-film" necessaria sia praticamente doppia rispetto a quella di cristallini, a causa del loro rendimento (si può arrivare fino a 17 m² per un kWp). A causa delle maggiori superfici necessarie, l'unico vantaggio dell'utilizzo dei moduli "thin-film" consiste in un minore impiego di materiale, che si riflette quindi in un maggior rispetto per l'ambiente.

Solitamente i pannelli sono collegati a un inverter che immette l'elettricità nella rete a bassa tensione (220 V). In seguito questa passa da un contatore che misura i kWh prodotti dall'impianto. Successivamente l'energia viene ceduta al gestore locale (AIL, AET, ecc.) che conteggia i kWh immessi. C'è poi un altro contatore che rileva i kWh prelevati dalla rete, cioè quelli necessari al funzionamento della casa. Questi vengono pagati secondo le normali tariffe sull'elettricità. Il risparmio sta nella differenza fra kWh prodotti e consumati.



Figura 2.12: cella fotovoltaica Monocristallina.



Figura 2.13: cella fotovoltaica "thin film".

2.5.3 Vantaggi e svantaggi

Come nel caso di geotermia e collettori, il maggior vantaggio è l'assenza di produzione di CO₂ parziale o completa, nel caso in cui l'impianto copra tutto il fabbisogno della casa. Un altro vantaggio è l'indipendenza dai fornitori, dal momento che l'energia viene prodotta tramite l'irraggiamento solare. Non da ultimo bisogna anche considerare il costo non troppo elevato necessario per un'installazione: tenendo conto del fatto che un impianto ha una durata di vita di circa 25-30 anni e che i tempi di recupero dell'investimento sono fortemente condizionati dal prezzo di acquisto dell'elettricità dalla rete pubblica, l'utente potrà risparmiare sulla bolletta dell'elettricità per circa 25 anni. Questo guadagno può essere incrementato, e con esso diminuito il tempo di recupero, se parte dell'energia prodotta viene venduta e immessa nella rete.

Oggi l'energia immessa in rete da produttori privati (che sfruttano energie rinnovabili) viene pagata per esempio 0,17 CHF/kWh dal Cantone tramite AET (Azienda Elettrica Ticinese) o AIL (vedi

² Il pannello perde l'1 % del 6 %, quindi dopo un anno il suo rendimento sarà pari a 5,94 %.

tabella a p. 18 per altri confronti). Tuttavia 18 centesimi a kWh sono davvero pochi, soprattutto se paragonati con le tariffe di altri paesi: l'Italia, ad esempio, paga da un minimo di 0,25 € (0,33 CHF) fino a un massimo di 0,4 € (0,53 CHF) per ogni kWh immesso nella rete e prodotto con pannelli fotovoltaici.

Il problema maggiore deriva dal fatto che i pannelli dipendono interamente dall'irraggiamento solare, perciò produce energia solo di giorno dalle 11:00 alle 15:00 circa in inverno e dalle 8:00 alle 18:00 in estate, ma anche dalle condizioni atmosferiche, dal momento che una nuvola che copre il Sole abbassa di moltissimo la produzione di elettricità. Un altro svantaggio deriva dai costi: anche se non esorbitante, è facilmente comprensibile come un investimento che può andare dai 20'000 ai 50'000 CHF non sia alla portata di tutti. È però importante far notare come il prezzo dei moduli siano in costante calo (vedi figura 2.14).

Il problema dei costi riguarda però anche i consumatori, dal momento che l'elettricità prodotta da centrali nucleari o idroelettriche costa 0,2 CHF/kWh, mentre quella prodotta con pannelli fotovoltaici costa circa 0,6 CHF/kWh. Anche in questo caso è facilmente comprensibile come diversi consumatori preferiscano spendere meno piuttosto che preoccuparsi per l'ambiente. Infine diverse difficoltà possono venire a galla al momento della richiesta di installazione: infatti diversi comuni bloccano la domanda di montaggio di impianti perché i pannelli rovinano l'insieme del centro abitato e quindi la vista sul paesaggio.

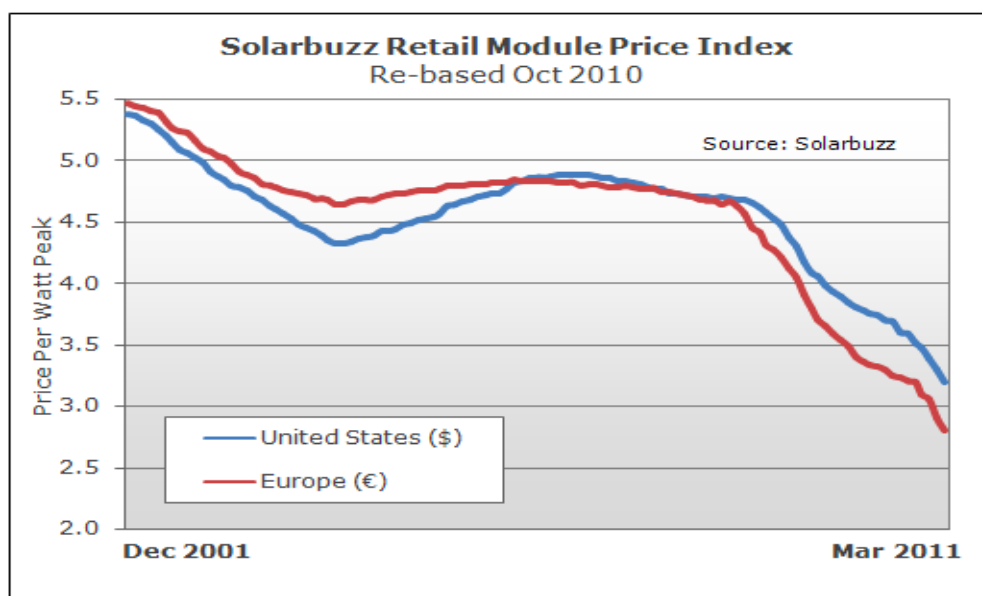


Figura 2.14: andamento dei prezzi dei moduli fotovoltaici.

Metodo	Azienda/ente	Cts/kWh	Limitazioni
Fotovoltaico - attualmente costituisce lo 0,8 % della produzione elettrica mondiale	Cantone (AET/AIL)	18	L'energia elettrica fotovoltaica è sempre stata molto costosa, tuttavia con i costanti miglioramenti di rendimento sarà possibile in futuro abbassare il costo al kWh dell'energia prodotta con i pannelli solari fino a renderla competitiva (20,2 cts/kWh) con i costi dell'energia elettrica nucleare o idrica, che attualmente si assestano attorno ai 16 cts/kWh (anche se è importante far notare come il costo reale si situi tra i 6 e i 9 cts/kWh)
	Massagno (AEM)	40	
	Swissgrid	40/50 (lista d'attesa di 3000 utenti)	
	Italia	25-40 (€)	
Geotermico - attualmente costituisce lo 0,23 % della produzione elettrica mondiale - affidabile al 95 %	Cantone (AET/AIL)	15 (costo del kWh al consumatore)	Il costo dipende dalla grandezza dell'impianto (più è grande e meno costa), ma anche dalla sua profondità. I migliori risultati si ottengono con un'alta differenza di temperatura, tuttavia si riscontrano grandi miglioramenti nel rendere molto efficiente l'impianto anche se si dispone di un ΔT basso. Anche in questo caso sarà possibile abbassare i costi al kWh.

Capitolo 3. Conduzione e convezione termica, coefficiente U

3.1 Calore

In termodinamica, si definisce con “ Q ” il calore, ovvero quell’energia termica trasmessa da un corpo freddo a uno più caldo (o viceversa). Il calore può essere trasmesso in tre modi: conduzione, convezione e irraggiamento. Esso è proporzionale sia alla massa degli oggetti o delle sostanze a contatto tra di loro, sia alla variazione della loro temperatura. Secondo il principio di conservazione dell’energia, possiamo affermare che il calore ceduto da una sostanza corrisponde al calore acquistato dall’altra.

La legge matematica che regola la cessione o l’acquisto di calore da parte di una sostanza è la seguente: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ [J], dove:

- m è la massa dell’oggetto o della sostanza [kg].
- ΔT è la differenza di temperatura del materiale [°C oppure K]
- c è il calore specifico, cioè un parametro fisico proprio di ogni materiale che ne descrive la capacità di acquistare o cedere calore per ogni unità di massa e per ogni grado di differenza di temperatura. La sua unità di misura è, di conseguenza: $J / kg \cdot K$

Sommando in un’equazione di bilancio termico i calori acquistati o ceduti (indicati rispettivamente con segno positivo o negativo) da n elementi otteniamo quindi che:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0.$$

3.2 Conduzione termica

La conduzione termica è un processo termodinamico per il quale tra due materiali (solidi) viene scambiato calore attraverso il contatto diretto.

Quando un materiale omogeneo la cui temperatura agli estremi non è la stessa, viene trasmessa dell’energia dall’estremo più caldo all’estremo più freddo. Il flusso di calore Φ tra le due estremità è quel valore che indica quanto calore ha attraversato il materiale in un certo intervallo di tempo. Questo parametro dipende dunque dalla superficie del materiale, definita come A , dalla lunghezza d della sbarra (o lo spessore di un materiale), dalle proprietà fisiche del materiale (λ) e dalla differenza di temperatura ai suoi capi (ΔT). La legge di Fourier relaziona questi parametri nella seguente formula:

$$\Phi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot A \left[\frac{Q}{\Delta t} \right].$$

Il parametro λ descrive la conducibilità termica del materiale, ossia la resistenza che esso oppone al passaggio del calore. Esso indica dunque quanta energia per unità di tempo attraversa un materiale di spessore 1m e di sezione 1m² per ogni °C (o K) di differenza di temperatura tra i due estremi dell’elemento. La sua unità di misura è dunque $[W / m \cdot K]$.

Per il principio di conservazione dell’energia in un sistema, bisogna notare che il flusso di calore in fornito ($Q_{\text{forn.}} / \Delta t$) deve corrispondere a quello asportato ($-Q_{\text{asp.}} / \Delta t$), altrimenti la temperatura del materiale aumenterebbe:

$$\Phi = \frac{Q_{\text{forn.}}}{\Delta t} = - \frac{Q_{\text{asp.}}}{\Delta t}.$$

Il calore fornito avrà segno positivo, al contrario di quello asportato.

Il flusso di calore deve essere costante anche quando esso attraversa due materiali differenti:

$$\Phi = \lambda_1 \cdot \frac{T_{\text{int}} - T_s}{d_1} \cdot A = \lambda_2 \cdot \frac{T_s - T_{\text{est}}}{d_2} \cdot A \quad (\text{equazione 1.0})$$

In questo caso avremo la stessa area di contatto, ma due coefficienti λ diversi (λ_1 λ_2), così come due temperature ai capi del singolo materiale diverse: accostando due materiali avremo infatti la temperatura sulla superficie esterna del primo (T_{int}), la temperatura della superficie di contatto (T_s) e la temperatura dell'altra superficie esterna (T_{est}).

Definiamo ora i coefficienti di trasmissione termica

$$\Lambda_1 = \frac{\lambda_1}{d_1} \text{ e } \Lambda_2 = \frac{\lambda_2}{d_2} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right];$$

risolvendo l'equazione 1.0 per rapporto a T_s , otteniamo una nuova formula per calcolare il flusso che ci permette di stabilire un parametro di trasmissione termica Λ_p equivalente all'unione dei singoli parametri:

$$\Phi = \Lambda_{\text{eq}} \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{est}}) \cdot A, \text{ dove: } \Lambda_{\text{eq}} = \frac{\Lambda_1 \cdot \Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2}.$$

La resistenza termica complessiva di un elemento è proporzionalmente inversa alla sua trasmissione, dunque, possiamo ricavare la formula per calcolare la resistenza termica al passaggio del flusso (riferita alla conduzione tra più materiali a contatto tra di loro):

$$R_{\text{cond}} = \frac{1}{\Lambda_{\text{eq}}} = \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{\Lambda_1 \cdot \Lambda_2} = \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right].$$

Con una parete di n elementi otteniamo:

$$R_{\text{cond}} = \frac{1}{\Lambda_{\text{eq}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right].$$

3.3 Convezione termica

La convezione termica è un processo fisico per il quale viene scambiato calore da un solido ad un fluido (acqua, aria,...). I moti convettivi dei fluidi sono dovuti alla loro variazione di densità, legata alla temperatura degli stessi.

Il modello che descrive la convezione è molto simile a quelle della conduzione:

Quando un solido è a contatto con un fluido la cui temperatura non è costante, possiamo descrivere il flusso di calore con una formula simile a quella di Fourier per la conduzione:

$$\Phi = h \cdot (T_{\text{fluido}} - T_{\text{superficie}}) \cdot A$$

dove h è il coefficiente di trasmissione termica superficiale, T_{fluido} la temperatura del fluido e $T_{\text{superficie}}$ la temperatura della superficie del solido. A differenza del coefficiente di trasmissione termica del paragrafo precedente, quello superficiale non è descritto da una relazione matematica tra spessore e conducibilità termica del materiale. Esso è molto complicato da calcolare e sovente si stabilisce sperimentalmente.

Quando il materiale si trova a contatto con due fluidi a temperature diverse (prendiamo ad esempio una parete di un edificio: essa si trova tra il fluido-aria esterno e quello interno), abbiamo due differenti coefficienti di trasmissione termica superficiale interni ed esterni, definiti come: h_{int} e h_{est} .

Possiamo perciò introdurre il concetto di resistenza termica legato alla convezione; in modo analogo alla conduzione esso è inversamente proporzionale alla trasmissione termica:

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{h_{\text{int}}} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \text{ e}$$

$$R_{\text{est}} = \frac{1}{h_{\text{est}}} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

dunque:

$$R_{\text{conv}} = R_{\text{int}} + R_{\text{est}} = \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{1}{h_{\text{est}}} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

3.4 Il coefficiente U – Pareti

Il coefficiente U è un parametro fisico riguardante la trasmissione termica di uno o più materiali in serie. Tale coefficiente riunisce infatti i concetti della teoria vista nei paragrafi precedenti, in particolare i coefficienti di trasmissione termica. Per i parametri sopra elencati, la formula del calcolo del coefficiente U unisce gli elementi di trasmissione termica sia per conduzione che per convezione:

$$U = \frac{1}{R_{\text{conv}} + R_{\text{cond}}} = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{est}} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right].$$

Nel campo dell'edilizia si usa come valore per il coefficiente di trasmissione termica superficiale interna:

$$h_{\text{int}} = 8 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right],$$

mentre per quella esterna vale:

$$h_{\text{est}} = 25 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right].$$

Ne consegue che i valori della resistenza saranno:

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{h_{\text{int}}} = 0,13 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \text{ e}$$

$$R_{\text{est}} = \frac{1}{h_{\text{est}}} = 0,04 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right].$$

Possiamo dunque semplificare la formula per il calcolo del coefficiente U nel seguente modo:

$$U = \frac{1}{R_{\text{cond}} + R_{\text{conv}}} = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{est}} + R_{\text{cond}}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + R_{\text{cond}}} = \frac{1}{0,17 + R_{\text{cond}}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right].$$

Un ulteriore fattore che dobbiamo tener presente è che il calore può essere trasmesso sia per conduzione (contatto diretto tra materiali), che per convezione (contatto fluido-materiale) ma anche per irraggiamento. L'energia contenuta nei raggi del Sole per esempio si trasmette alla parete colpita da essi fornendo un apporto energetico "gratuito". Anche nel caso dell'irraggiamento il flusso vale :

$$\Phi = \Lambda_p \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{est}}) \cdot A,$$

dove T_{int} e T_{est} sono le temperature delle due superfici esterne e Λ_p è il parametro di trasmissione termica.

Nei nostri calcoli non abbiamo tenuto conto dell'irraggiamento poiché non abbiamo i dati di relativi a ogni singola finestra e, di conseguenza, non possiamo calcolare l'apporto energetico dato dal Sole (anche perché non conosciamo che percentuale di flusso solare viene assorbita dal vetro e quale percentuale viene riflessa).

La figura riassume le caratteristiche di trasmissione termica di una parete o in generale di un materiale, tenendo conto solo della convezione e della conduzione:

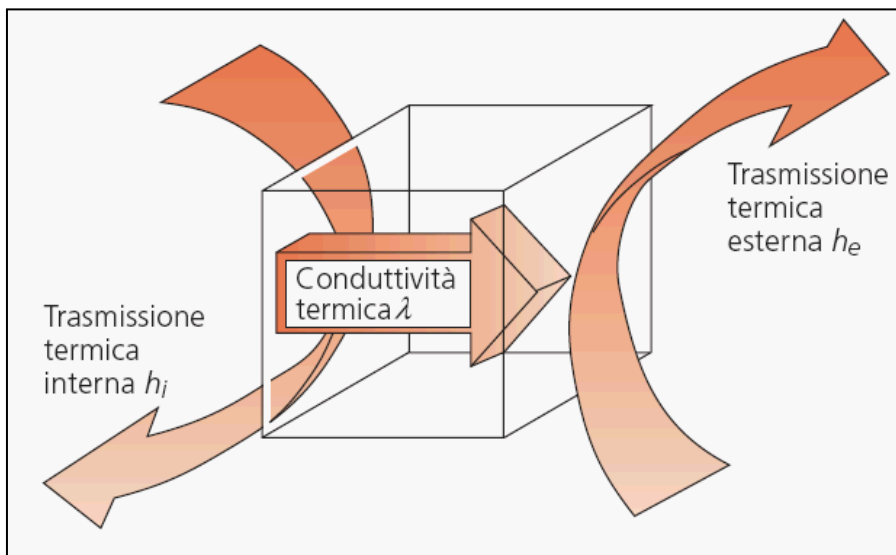


Figura 3.1: il coefficiente U varia in funzione di h_{int} , h_{ext} e λ .

La tabella seguente riporta alcuni coefficienti λ di vari materiali.

Materiale		Coefficiente λ [$W/m \cdot K$]
Isolanti	Polietilene espanso in lastre	0,04
	Lana di vetro	0,04
	Poliuretano	0,03
	Lana di roccia	0,04
Pannelli costruttivi	Cartongesso	0,21
	Pannelli in legno compensato	0,45
Materiali vari	Acciaio	60
	Alluminio	200
	Vetro	1,15
Pavimentazione e intonaci	Massetto tradizionale in cemento	1,4
	Ceramica	1,2
	Intonaco in cemento	1,4
	Intonaco in calce	0,8
	Intonaco in gesso	0,7
Materiali da muratura	Mattoni da costruzione	0,6-2,5 (a seconda del tipo)
	Cemento armato	2,3
	Calcestruzzo	1,6

3.5 Il coefficiente U – Finestre

La formula per calcolare il coefficiente U nelle finestre è la seguente:

$$U = \frac{A_v \cdot U_v + A_t \cdot U_t + \psi \cdot l}{A_{\text{tot}}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

dove :

- A_v è la superficie del vetro [m^2]
- U_v è il coefficiente U del vetro [$W/m^2 \cdot K$]
- A_t è la superficie di telaio [m^2]
- U_t è il coefficiente U del telaio [$W/m^2 \cdot K$]
- ψ è il coefficiente di scambio termico fra telaio e vetro [$W/m \cdot K$]
- l è il perimetro del vetro [m]
- A_{tot} è la superficie di tutte le finestre (vetro e telaio) [m^2]

3.6 Esempio di calcolo di coefficiente U

Porteremo ora l'esempio di un muro, costruito, a partire dall'esterno, in calcestruzzo, polietilene espanso e intonaco in calce. I rispettivi coefficienti λ sono:

- Calcestruzzo: $1,6 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- Polietilene espanso: $0,04 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- Intonaco in calce: $0,8 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

Gli spessori degli elementi sono:

- Calcestruzzo: 0,2 m
- Polietilene espanso: 0,07 m
- Intonaco in calce: 0,02 m

Il coefficiente U del muro è uguale a:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + \frac{0,2}{1,6} + \frac{0,07}{0,04} + \frac{0,02}{0,8}} \cong 0,48 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Questo risultato significa che, per un tale muro, il flusso termico che lo attraversa per ogni unità di tempo è di 0,48 J/s per ogni metro quadrato di superficie e per ogni grado di differenza tra la temperatura dell'interno e quella dell'esterno.

Nello schema seguente è disegnata la sezione laterale del muro preso come esempio: lo strato più interno è in calcestruzzo armato, quello intermedio è composto da un cappotto isolante (polietilene espanso) mentre lo strato più esterno del muro è l'intonaco in calce.

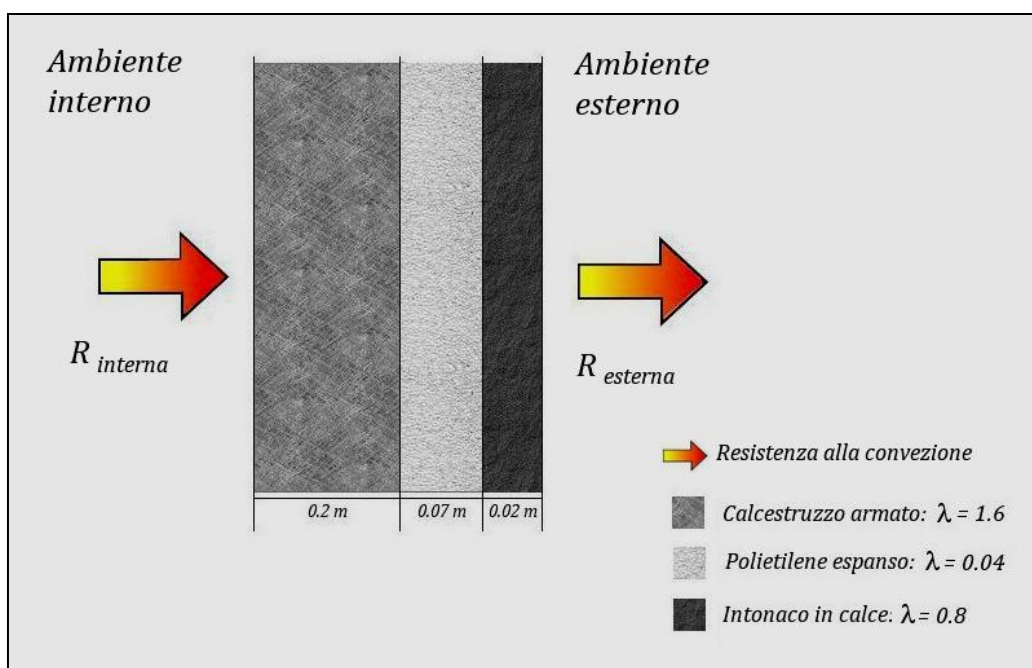


Figura 3.2: schematizzazione della sezione laterale di un muro.

È importante notare che il valore massimo del coefficiente U per i muri in Svizzera deve essere per legge (dal 2010) di $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (fonte, Programma Edifici, Ufficio Federale dell'Energia).

3.7 L'energia dispersa da un elemento costruttivo

Per calcolare l'energia dispersa nell'arco di un anno (E_{ann}) da un elemento costruttivo bisogna inserire il coefficiente U , precedentemente calcolato, nella seguente formula:

$$E_{\text{ann}} = U \cdot A \cdot GG \cdot \frac{h}{g} \cdot \frac{1}{1000}$$

Dove:

- U è il coefficiente di dispersione termica dell'elemento.
- A è la superficie dell'elemento.
- GG è il parametro dei gradi-giorno.

Questo parametro permette di valutare approssimativamente il fabbisogno energetico di uno stabile partendo dalla temperatura. Detto in parole povere, l'utilizzo dei gradi-giorno permette di risparmiare il calcolo di $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ per ogni giorno dell'anno, indispensabile per ricavare l'energia necessaria a portare una massa da una temperatura inferiore a una superiore o viceversa.

Il calcolo dei gradi-giorno di una determinata regione viene effettuato innanzitutto stabilendo un valore medio della temperatura interna degli edifici (nel nostro caso essa vale 20°C). In seguito bisogna sommare, per ogni giorno di riscaldamento (ovvero quelli nei quali la temperatura media esterna è inferiore ai 12°C) la differenza tra la "temperatura-linea" e quella media misurata.

In Svizzera i GG sono indicati anche con "GG 20/12", in base ai due valori stabiliti dalla convenzione.

Nella zona di Lugano, alla quale faremo riferimento per i nostri calcoli, i GG sono 2401 (fonte: <http://www.hev-schweiz.ch/vermieten-verwalten/heizgradtage/heizgradtage-2009/>).

Osservazione: l'unità di misura dei GG è $\left[\frac{\text{K} \cdot \text{g}}{\text{anno}} \right]$.

- $\frac{h}{g}$ sono le ore in un giorno, ovvero 24.
- $\frac{1}{1000}$ permette di passare dai Wh ai kWh

Osservazione: unità di misura dell'energia

$$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{\text{K} \cdot \text{g}}{\text{anno}} \cdot \frac{h}{g} \cdot \frac{1}{1000} = \left[\frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \right]$$

3.8 Esempio di calcolo di energia dispersa: vetrata delle palestre

Consideriamo un elemento costruttivo del quale conosciamo i dati necessari, al fine di valutare l'energia dispersa nell'arco di un anno da tale elemento.

Ci è sembrato interessante eseguire il calcolo sulla vetrata delle palestre del liceo. Essa ricopre un'intera parete dell'edificio delle palestre (staccato rispetto al liceo). La sua costruzione è avvenuta negli anni '70 insieme all'edificio principale; tuttavia, a differenza di esso, non ha subito interventi di risanamento energetico, dunque i vetri sono ancora semplici vetri singoli e di conseguenza il coefficiente U è molto alto: $5 \text{ W/m}^2\text{K}$. La vetrata si estende su tutti i 45 metri di lunghezza delle palestre ed è alta 9,96 m. La sua superficie vale dunque: $448,2 \text{ m}^2$.

In base alla formula descritta sopra, il dispendio annuo di energia (E_{disp}) della vetrata ammonta dunque a: $E_{\text{disp}} = 129'135,4 \text{ [kWh/anno]}$



Figura 3.3 : vetrate delle palestre del liceo.

Capitolo 4. Isolazione termica del liceo

Studiamo ora concretamente i consumi e i fabbisogni energetici del nostro liceo analizzando i materiali di costruzione, la loro conduzione termica, le dimensioni dell'edificio e la sua architettura.

Inizialmente abbiamo ottenuto le planimetrie dell'edificio, per mezzo delle quali siamo riusciti a farci un'idea della tipologia di materiali utilizzati: nella costruzione è stato utilizzato prevalentemente il calcestruzzo, sebbene alcuni parapetti siano in cotto, mentre il rivestimento esterno è costituito da lastre prefabbricate in *Siporex* e da uno strato di 4 cm di materiale isolante. Dopo aver chiarito, almeno approssimativamente, quali sono i materiali di costruzione, abbiamo richiesto la consulenza dell'ingegnere Riccardo Arlunno, presso l'azienda IFEC Consulenze di Rivera, la quale si occupa di disegnare profili energetici di edifici. L'ingegner Arlunno ci ha fornito le nozioni teoriche necessarie per poter calcolare l'energia dispersa da un determinato elemento costruttivo, conoscendone il materiale o la composizione di materiali (nel caso, per esempio, di una parete composta da più strati di materiali). Attraverso le planimetrie abbiamo potuto suddividere l'edificio nei suoi principali elementi costruttivi che sono: finestre, parapetti, pareti, tetto e pavimenti.

Abbiamo poi calcolato la superficie di tutti questi elementi: il compito ci è stato facilitato, almeno per quanto riguarda i pavimenti e i tetti, dal fatto che sulle planimetrie i dati necessari erano già presenti, così che abbiamo potuto sommarli. Questo ci ha evitato di dover misurare le dimensioni di tali superfici.

Una stima è stata necessaria invece per le finestre: tutte le aule hanno lo stesso tipo di serramento, ma sui piani architettonici non sono indicate le misure. Abbiamo dunque dovuto contare il numero di aule e il numero di finestre per ogni aula; misurando l'area del telaio e quella del vetro siamo riusciti indicativamente ad approssimare la superficie totale delle finestre.

Questo tipo di procedimento è stato adottato anche per calcolare la superficie totale dei parapetti, che abbiamo ricavato in relazione al numero di finestre. La particolare architettura dell'edificio ci ha causato qualche difficoltà nel determinare le sue superfici di contatto con il terreno: il liceo infatti ha due piani che poggiano sul terreno, i quali sono collegati da una parete verticale che abbiamo definito "parete di appoggio". Tuttavia, il piano più basso non appoggia totalmente sul terreno: una parte di esso è rialzata rispetto ad esso e di conseguenza non conta come superficie di appoggio. L'area dei pavimenti di appoggio è stata calcolata grazie alle planimetrie, come per gli altri elementi costruttivi, mentre per la parete verticale abbiamo dovuto approssimare: come valori abbiamo utilizzato l'altezza delle aule del piano più in basso e l'abbiamo moltiplicata per la lunghezza dell'edificio.

Un ultimo lavoro che abbiamo ritenuto necessario effettuare è stato il calcolo dell'area che abbiamo definito come "calpestabile", cioè quell'area utilizzata quotidianamente, al fine di rendere l'idea delle dimensioni dell'edificio.

Sempre a livello indicativo abbiamo calcolato i totali della superficie di contatto con il terreno e della superficie che effettivamente scambia calore con l'esterno.

Nella tabella seguente sono riassunti i dati raccolti, sia con le stime che con i valori delle planimetrie.

Volume edificio	30'508 m ³
Superficie tetto	4660,9 m²
Pavimento "calpestabile"	8035 m ²
... di cui pavimento rialzato	1326,65 m²
... di cui pavimento appoggiato sul terreno	2552 m²
Superficie pareti di appoggio	846,45 m²
Superficie pareti	192,72 m²
Superficie finestre	731,7 m²
... di cui telaio	507 m ²
... di cui vetro	224,7 m ²
Superficie parapetti	414,7 m²
TOTALE superficie di contatto (terreno)	3398 m ²
TOTALE superficie di scambio termico	10'724,47 m ²

NB: le cifre in grassetto sono state sommate per ricavare il totale di superficie di scambio termico.

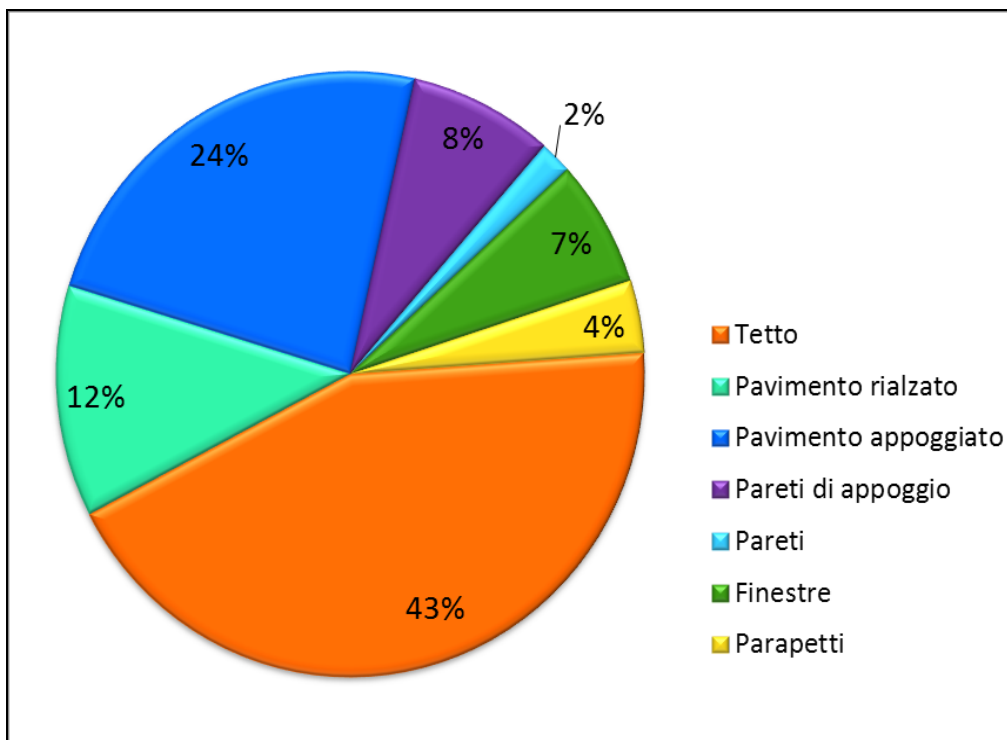


Figura 4.1: percentuale di superficie di scambio dei singoli elementi per rapporto al totale.

4.1 Dispendio energetico: superfici di scambio

Il passo successivo è stato quello di calcolare la capacità di scambiare energia con l'esterno propria di ogni componente. Il principale ostacolo di questo procedimento è stato rappresentato dalla difficoltà nello stabilire lo spessore. Per risolvere questa complicazione abbiamo deciso di effettuare i calcoli assumendo che tutti i muri fossero fatti in calcestruzzo: come spessore abbiamo utilizzato quello riportato nei disegni, dai quali abbiamo anche notato che la maggior parte della costruzione è dotata di isolamento termica, sebbene lo spessore di questo strato sia molto piccolo (soli 4 cm). Ciò che ci ha stupito di questa constatazione è il fatto che le pareti a contatto con il terreno, così come i pavimenti ai piani-terreno, sono prive di isolamento termica.

Per valutare l'energia dispersa annualmente abbiamo applicato la formula del paragrafo 3.7 a tutti gli elementi.

Seguono una descrizione degli elementi costruttivi (materiale, spessore, coefficiente lambda), una tabella che riporta i calcoli e un grafico che paragona i risultati.

<u>Pareti</u> → 192,72 m² → 7,5 cm calcestruzzo, $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ → 10 cm isolante "base", $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ <u>Parapetti</u> → 414,7 m² → 7,5 cm calcestruzzo, $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ → 10 cm isolante "base", $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ <u>Tetto</u> → 4660,9 m² → 28 cm calcestruzzo, $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ → 4 cm isolante "base", $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ <u>Pavimento rialzato</u> → 1326,65 m² → 10 cm calcestruzzo, $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ → 4 cm isolante "base", $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$	<u>Pavimenti su terreno</u> → 2552 m² → 28 cm calcestruzzo, $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ <u>Pareti contro terreno</u> → 846,45 m² → 30 cm calcestruzzo, $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ <u>Finestre</u> → vetro: 1,5 m² → telaio: 0,665 m² → ca. 169 finestre, 2 battenti = 338 vetri e telai Area totale: $A_{\text{vetro}} = 507 \text{ m}^2$ $A_{\text{telaio}} = 224,7 \text{ m}^2$ → Vetro doppio anni '80 → $U_{\text{vetro}} = 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ → Telaio metallico → $U_{\text{telaio}} = 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ → Ponte termico lineare tra i due vetri (serramenti): $\Psi = 0,19 \text{ W/mK}$ → lunghezza isolante = 2,5 cm
---	--

Calcolo del coefficiente U dei singoli elementi:

Elemento	Calcolo: $U = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{est}} + R_{\text{cond}}}$	Coefficiente $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Pareti	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,075}{1,8} + \frac{0,1}{0,04}}$	0,36
Parapetti	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,075}{1,8} + \frac{0,1}{0,04}}$	0,36
Tetto	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8} + \frac{0,04}{0,04}}$	0,75
Pavimento rialzato	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,1}{1,8} + \frac{0,04}{0,04}}$	0,8
Parete contro terreno	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,3}{1,8}}$	2,9
Pavimento su terreno	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8}}$	3
Finestre		3,5

Dai risultati ottenuti è possibile notare che la parete contro il terreno del piano inferiore e il pavimento a contatto con il terreno hanno un coefficiente U molto vicino a quello delle finestre, nonostante si tratti di due elementi costruttivi completamente differenti. Inoltre il valore di questo parametro (3 W/m²K) è altissimo, a causa dell'assenza di qualsiasi tipo di isolamento. Ricordiamo inoltre che il valore massimo di questo coefficiente, per legge, dovrebbe essere di 0,2 W/m²K.

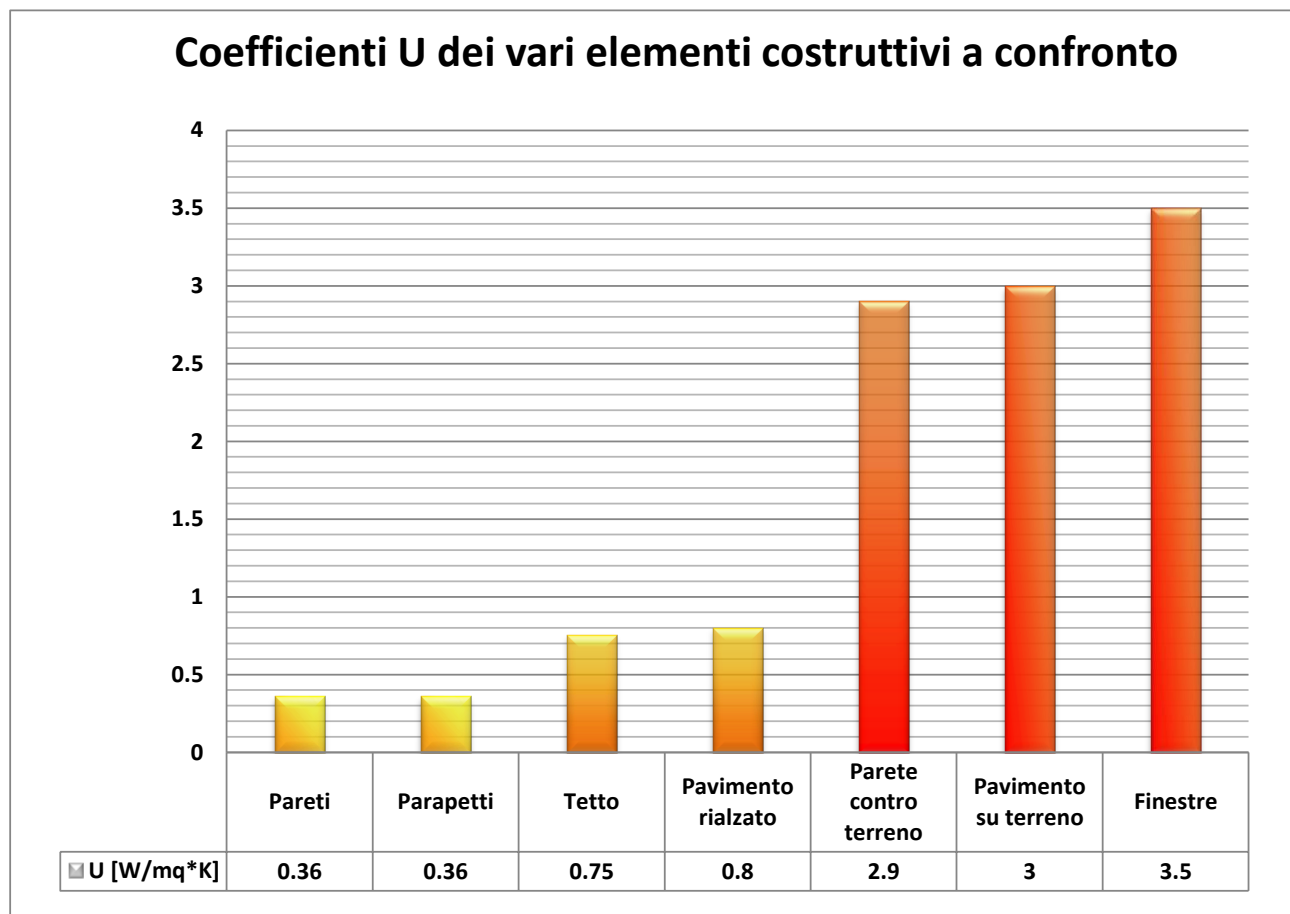


Figura 4.2: coefficienti U delle componenti costruttive del liceo a confronto.

Energia dispersa dai singoli elementi:

Elemento	Calcolo: $E_{\text{ann}} = U \cdot A \cdot GG \cdot \frac{h}{g} \cdot \frac{1}{1000}$	Dispendio annuale $\left[\frac{kWh}{\text{anno}} \right]$
Pareti	$0,36 \cdot 192,72 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	3997,9
Parapetti	$0,36 \cdot 414,7 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	8602,8
Pavimento rialzato	$0,75 \cdot 4660,9 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	61'157,5
Parete contro terreno	$3 \cdot 2552 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	141'458,3
Finestre	$0,8 \cdot 1326,65 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	147'572,2
Tetto	$2,9 \cdot 846,5 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	201'434,8
Pavimento su terreno	$3,5 \cdot 731,7 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	441'169,3
TOTALE		1'005'392,8

Secondo i dati ottenuti dai nostri calcoli l'edificio del liceo disperde 1'005'392,8 kWh all'anno (circa 186 tonnellate di CO₂).

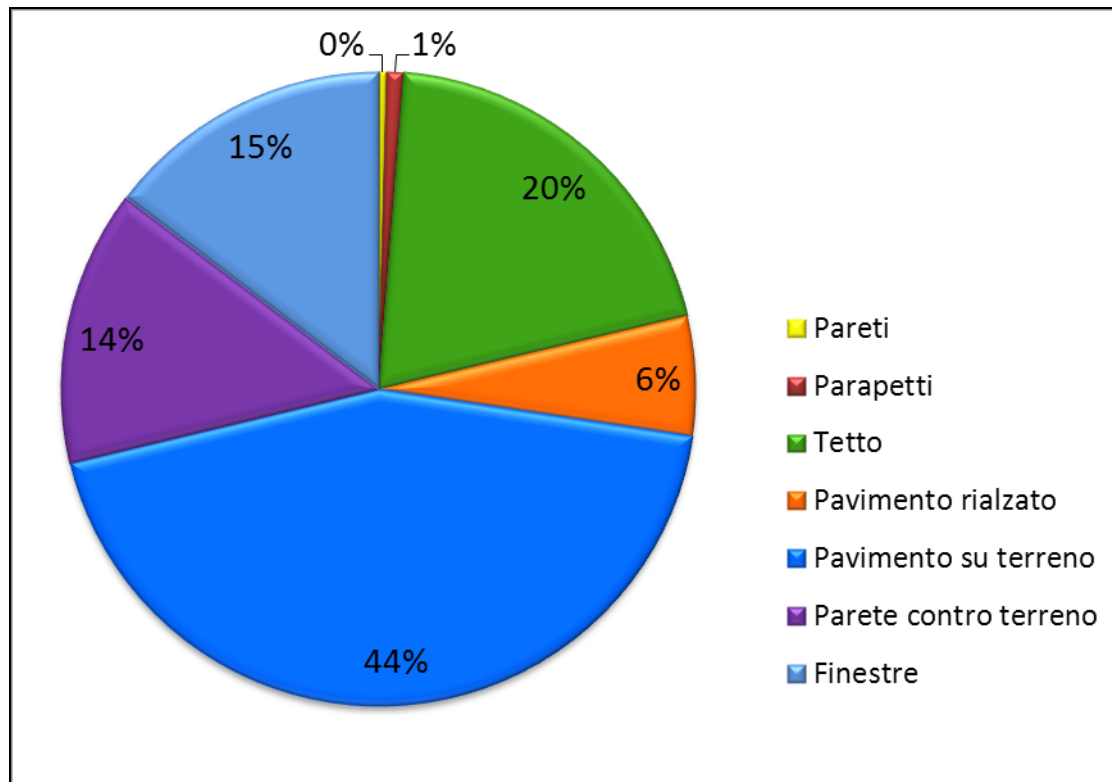


Figura 4.3: percentuali di dispersione energetica dei singoli elementi per rapporto al totale.

Per poter avere una serie di dati di confronto, abbiamo deciso di calcolare il consumo energetico del liceo applicando uno strato di 20 cm di isolante *PAVATHERM*, costituito da pannelli in legno compensato di $\lambda = 0,038$ W/mK, sviluppati dalla ditta *Pavatex*.

Di conseguenza gli spessori degli isolanti saranno:

- Pareti:
10 cm con $\lambda = 0,04$ W/mK + 20 cm con $\lambda = 0,038$ W/mK
- Parapetti:
10 cm con $\lambda = 0,04$ W/mK + 20 cm con $\lambda = 0,038$ W/mK
- Tetto:
4 cm con $\lambda = 0,04$ W/mK + 20 cm con $\lambda = 0,038$ W/mK
- Pavimento rialzato:
4 cm con $\lambda = 0,04$ W/mK + 20 cm con $\lambda = 0,038$ W/mK

Calcolo dei coefficienti U dei vari elementi con l'aggiunta del nuovo isolante:

Elemento	Calcolo: $U = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{est}} + R_{\text{cond}}}$	Coefficiente $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Pareti	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,075}{1,8} + \frac{0,10}{0,04} + \frac{0,2}{0,038}}$	<i>0,125</i>
Parapetti	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,075}{1,8} + \frac{0,10}{0,04} + \frac{0,2}{0,038}}$	<i>0,125</i>
Tetto	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8} + \frac{0,04}{0,04} + \frac{0,2}{0,038}}$	<i>0,152</i>
Pavimento rialzato	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,1}{1,8} + \frac{0,04}{0,04} + \frac{0,2}{0,038}}$	<i>0,154</i>

Calcolo del nuovo dispendio energetico annuale:

Elemento	Calcolo	Dispendio annuale $\left[\frac{kWh}{anno} \right]$
Pareti	$0,125 \cdot 192,72 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>1388,2</i>
Parapetti	$0,125 \cdot 414,7 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>2987,1</i>
Tetto	$0,152 \cdot 4660,9 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>40'824,1</i>
Pavimento rialzato	$0,154 \cdot 1326,65 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>11'772,8</i>
Pavimento su terreno	$3,5 \cdot 731,7 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>441'169,3</i>
Parete contro terreno	$3 \cdot 2552 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>141'458,3</i>
Finestre	$0,8 \cdot 1326,65 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	<i>147'572,2</i>
TOTALE		<i>787'172</i>

Nella tabella precedente, i risultati in corsivo indicano i valori che sono stati modificati rispetto alla situazione originale.

Con l'isolazione in *PAVATHERM* le perdite energetiche annuali ammontano a 787'172 kWh, ciò significa che la dispersione di energia viene dunque ridotta di 218'220,8 kWh, ossia quasi il 22 % in meno del consumo attuale.

Sapendo che un m³ di gas corrisponde a 10,8 kWh di energia, con il cappotto isolante in *PAVATHERM* si risparmierebbero³ 20'205,5 m³ di gas. In base alle bollette di AIL, basate sul parametro di UC (unità di consumo), possiamo calcolarne il costo. L'unità di consumo è un parametro AIL che si ottiene moltiplicando il consumo misurato in metri cubi per un fattore che tiene conto del contenuto energetico del gas (esso vale 11.12 per il gas naturale). L'azienda vende il gas a 0,06 CHF/UC, dunque vengono risparmiati 13'480 CHF⁴ all'anno sul consumo di gas per il riscaldamento dello stabile. Sapendo che la combustione di 1 m³ produce circa 2 kg di CO₂, verrebbero immessi ben 40'411 kg di CO₂ in meno ogni anno.



Figura 4.4: pannelli di *PAVATHERM*.

Conoscendo la superficie da rivestire con il *PAVATHERM*, con il quale si vorrebbe concretamente migliorare l'isolazione termica del liceo, è dunque possibile calcolare i costi della quantità necessaria di materiale. Questo tipo di legno compensato è venduto, per ordini superiori ai 300 m² (come nel nostro caso), al prezzo di 16 CHF/m², ma comprendendo il costo del lavoro di posa e l'aggiunta dell'IVA (8 %), si arriva a 300 CHF/m².

Le superfici da risanare sarebbero, come visto in precedenza, le pareti, i parapetti, il tetto e il pavimento rialzato rispetto al terreno del piano con le aule di scienze. Inserendo i valori delle rispettive superfici, otteniamo dunque un costo di materiale pari a 1'978'491 CHF.

La cifra della comanda è senza dubbio molto grande, specialmente per il fatto che dev'essere fornita da un fondo pubblico. Tuttavia, come abbiamo ottenuto dai due esempi sopra riportati, l'intervento di risanamento permetterebbe di risparmiare 13'480 CHF all'anno, dunque, dividendo il costo totale dell'operazione per il risparmio annuo, otteniamo che la cifra verrebbe "recuperata" in 146,7 anni. Un tempo di recupero pari a 147 anni è chiaramente improponibile per qualsiasi edificio, soprattutto per uno il cui tempo di vita si aggira intorno ai 50 anni.

Queste considerazioni si basano unicamente sul tempo di ammortamento dell'investimento iniziale grazie al risparmio energetico annuale. L'investimento nell'isolazione permette soprattutto di ridurre il consumo di gas naturale per il riscaldamento e le emissioni di CO₂ (gas che incrementa

³ 1 m³ di gas corrisponde a 10,8 kWh

⁴ 218'220,8 · 11,12 · 0,06 = 13'480

l'effetto serra). Pertanto tale investimento è utile dal punto di vista ambientale nella prospettiva di ridurre il riscaldamento globale del pianeta.

Sono importanti anche altre considerazioni di ordine politico in quanto il risparmio di energia permetterebbe alla Svizzera di ridurre la sua dipendenza energetica dai grandi Paesi produttori che detengono il monopolio delle materie prime e pertanto possono, da un lato, variare i prezzi a piacimento mentre dall'altro possono decidere quanta materia prima commerciare, come ad esempio la Russia nel caso del gas naturale.

4.2 Dispendio energetico: finestre

Come descritto precedentemente, la formula per calcolare il coefficiente U delle finestre è la seguente:

$$U = \frac{A_v \cdot U_v + A_t \cdot U_t + \psi \cdot l}{A_{\text{tot}}}$$

i valori del nostro liceo saranno dunque:

$$U = \frac{507 \cdot 5,8 + 224,7 \cdot 4 + 0,19 \cdot 1690}{731,7} = 7,326 \text{ W/m}^2\text{K}$$

È importante far notare che:

- il valore ψ è uguale a 0,19 W/mK
- la lunghezza dell'isolante è uguale a:
perimetro*numero di finestre = $(1 \cdot 2 + 1,5 \cdot 2) \cdot 338 = 1690 \text{ m}$

Avendo ottenuto il coefficiente U calcoliamo il dispendio annuale in kWh:

$$U \cdot A \cdot GG \cdot \frac{h}{g} \cdot \frac{1}{1000} = 7,326 \cdot 731,7 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000} = 308'890 \text{ kWh/anno.}$$

In un anno le finestre dell'edificio disperdono quindi 308'890 kWh (circa 57 tonnellate di CO₂), che corrispondono a 19'082 CHF

Assumiamo che le finestre attuali vengano sostituite con altre finestre a triplo vetro, i cui coefficienti U del vetro e del telaio corrispondono a 0,6 e 0,73 W/m²K.

Coefficiente U :

$$U = \frac{507 \cdot 0,6 + 224,7 \cdot 0,73 + 0,19 \cdot 1690}{731,7} = 1,079 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Dispendio annuale:

$$E_{\text{disp}} = 1,079 \cdot 731,7 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000} = 45'484 \text{ kWh/anno}$$

Il nuovo dispendio energetico corrisponde dunque a 45'484 kWh, ovvero ben 263'405,66 kWh in meno ogni anno.

Verrebbero quindi risparmiati 16'272 CHF/anno (circa 49 tonnellate di CO₂). Confrontando questo dato con quello ottenuto con un'ipotetica sostituzione delle isolazioni, notiamo che sostituendo le finestre otterremmo un guadagno non molto più alto (1,2 volte).

Sapendo che una finestra a vetro triplo costa in media 1000 CHF/m² e la posa costa circa 100 CHF/m², il costo della sostituzione di tutti i vetri dell'edificio si aggirerebbe attorno agli 804'870 CHF. La spesa verrebbe quindi recuperata in 49,5 anni.

Il tempo di recupero così elevato rende questa operazione non molto vantaggiosa, tuttavia se i vetri nuovi fossero dei doppi vetri termoisolanti anziché tripli, il costo sarebbe molto inferiore (ca. 250 CHF/m²) e il coefficiente U si aggirerebbe attorno ai 1,4 W/m²K, per cui il dispendio annuale di energia sarebbe pari a circa 59'028 kWh/anno. Verrebbero quindi risparmiati 249'860,66 kWh ogni anno, che corrispondono a 15'436 CHF (circa 46 tonnellate di CO₂). Questa cifra non è molto inferiore a quella risparmiata sostituendo le vetrature attuali con vetri tripli (16'272 CHF/anno), e il tempo di ritorno è molto più interessante, dal momento che corrisponde a circa 16,59 anni, ovvero un numero non elevato considerato il fatto che la durata di un edificio scolastico è di circa 50 anni.

4.3 Dispendio energetico: stabile delle palestre

Al contrario dell'edificio delle aule, per le palestre non abbiamo potuto disporre dei progetti. Per questo abbiamo dovuto misurare manualmente le dimensioni, che risulteranno quindi leggermente approssimate:

Lunghezza	52 m
Larghezza	37 m
Altezza	10 m

È importante notare che un intero lato è occupato dalle vetrature, di cui abbiamo precedentemente calcolato il dispendio energetico (cfr. Capitolo 3.5). Abbiamo assunto che la composizione delle pareti delle palestre fosse la stessa di quella delle aule. Gli spessori e i coefficienti λ saranno quindi i seguenti:

Elemento	Spessore [cm] Superficie [m ²]	Coefficiente $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Pareti	Calcestruzzo: 7,5 Isolante: 10 Superficie: 1260	Calcestruzzo: 1,8 Isolante: 0,04
Tetto	Calcestruzzo: 28 Isolante: 4 Superficie: 1924	Calcestruzzo: 1,8 Isolante: 0,04
Pavimento	Calcestruzzo: 28 Superficie: 1924	Calcestruzzo: 1,8

I coefficienti U corrispondono dunque a:

Elemento	Calcolo: $U = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{est}} + R_{\text{cond}}}$	Coefficiente $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Pareti	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,075}{1,8} + \frac{0,10}{0,04}}$	0,369
Tetto	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8} + \frac{0,04}{0,04}}$	0,754
Pavimento	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8}}$	3,072

Il dispendio energetico corrisponde quindi a:

Elemento	Calcolo	Dispendio annuale $\left[\frac{kWh}{\text{anno}} \right]$
Pareti	$0,369 \cdot 1260 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	26'791,7
Tetto	$0,754 \cdot 1924 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	83'594,9
Pavimento	$3,072 \cdot 1924 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	340'588,3
Finestre		129'135,4
Totale		580'110,3

Il dispendio annuale delle palestre ammonta quindi a 580'110 kWh (circa 107 tonnellate di CO₂).
 Aggiungiamo uno strato di 20 cm di *PAVATHERM* con coefficiente $\lambda = 0,038 \text{ W/mK}$ e calcoliamo il nuovo dispendio annuale.

I nuovi spessori e i coefficienti λ corrisponderanno quindi a:

Elemento	Spessore [cm] Superficie [m ²]	Coefficiente $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Pareti	Calcestruzzo: 7,5 Pavatherm: 30 Superficie: 1260	Calcestruzzo: 1,8 Pavatherm: 0,038
Tetto	Calcestruzzo: 28 Pavatherm: 24 Superficie: 1924	Calcestruzzo: 1,8 Pavatherm: 0,038
Pavimento	Calcestruzzo: 28 Superficie: 1924	Calcestruzzo: 1,8

I nuovi coefficienti U corrisponderanno quindi a:

Elemento	Calcolo: $U = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{est}} + R_{\text{cond}}}$	Coefficiente U $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Pareti	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,075}{1,8} + \frac{0,3}{0,038}}$	0,123
Tetto	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8} + \frac{0,24}{0,038}}$	0,15
Pavimento	$\frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,28}{1,8}}$	3,072

Il nuovo dispendio energetico è pari a:

Elemento	Calcolo	Dispendio annuale $\left[\frac{kWh}{\text{anno}} \right]$
Pareti	$0,123 \cdot 1260 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	8930,6
Tetto	$0,15 \cdot 1924 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	16'630,3
Pavimento	$3,072 \cdot 1924 \cdot 2401 \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$	340'588,3
Finestre		129'135,4
Totale		495'284,6

Aggiungendo uno strato di 20 cm di *PAVATHERM* il liceo consumerebbe 495'284,6 kWh ogni anno, ovvero 84'825,7 kWh (circa 16 tonnellate di CO₂) in meno rispetto al consumo attuale. Questo significa che sul riscaldamento si risparmierebbero 5240 CHF.

Il costo del risanamento, basato sul costo di fornitura materiale e posa di 300 CHF/m², si aggira attorno ai 955'200 CHF, che verrebbero recuperati in 182,3 anni. Il tempo di recupero è ovviamente improponibile per un edificio scolastico.

Sostituiamo ora i vetri delle palestre con un doppio vetro termoisolante, come nell'esempio del capitolo 4.2. Manteniamo invece intatte le insolazioni.

Le misure delle finestre sono le seguenti:

Elemento	Lunghezza [m] Superficie [m ²]
Altezza finestra	0,996 m
Lunghezza finestra	2,5 m
Altezza vetro	0,896 m
Lunghezza vetro	2,35 m
Area totale vetro	379 m ²
Area totale telaio	69,2 m ²
Area totale finestre	448,2 m ²
Perimetro totale finestre	1258,56 m

Il coefficiente U di tutta la finestra è 1,4 W/m²K, per cui il dispendio annuale è pari a 36'157,9 kWh/anno, ovvero 92'977,5 kWh (17 tonnellate di CO₂) in meno ogni anno, che corrispondono a un risparmio di 5744 CHF. Il costo dell'operazione sarebbe pari a circa 156'870 CHF e verrebbe recuperato in 27,3 anni.

Il tempo di recupero è molto più basso rispetto a quello ottenuto con la sostituzione delle isolazioni, anche se rimane abbastanza elevato. È però importante far notare come i due risparmi ricavati siano praticamente uguali (1,09 volte) nonostante la sostituzione delle finestre costi un decimo di quella delle isolazioni. Questa differenza è data dal fatto che il guadagno sulla sostituzione delle finestre è molto alto data la pessima capacità di isolamento delle finestre attuali.

Tabella riassuntiva degli esempi di risanamento dell'edificio del liceo:

Tipo di intervento	Risparmio energetico [kWh/anno] e [ton di CO₂/anno]	Risparmio economico [CHF/anno]	Costo dell'operazione [CHF]	Tempo di recupero [anni]
Isolazione dell'edificio delle aule in <i>PAVATHERM</i>	218'220 40	13'567	1'978'491	147
Sostituzione dei vetri delle aule con vetri tripli	263'406 49	16'272	804'870	49
Sostituzione dei vetri delle aule con vetri doppi termoisolanti	249'861 46	15'438	256'095	17
Isolazione dell'edificio delle palestre in <i>PAVATHERM</i>	84'825 16	5240	955'200	182
Sostituzione delle vetrate delle palestre con vetri doppi termoisolanti	92'977 17	5744	156'870	27

4.4 Fotografie dell'edificio liceale



Figura 4.5: stabile del liceo - segreteria, direzione e piano superiore.



Figura 4.6: stabile del liceo - piani sovrapposti in modo energeticamente dispersivo.



Figura 4.7: stabile del liceo - sovrapposizione di piani energeticamente dispersiva.



Figura 4.8: stabile del liceo - aula sporgente di storia , energeticamente dispersivo.



Figura 4.9: stabile del liceo - piano rialzato di scienze, energeticamente dispersivo.



Figura 4.10: stabile del liceo - vista frontale dei tre piani (il primo è rialzato).

Capitolo 5. Studio sul consumo di acqua calda sanitaria

5.1 Stima del consumo

Per effettuare lo studio del consumo di acqua calda sanitaria abbiamo dovuto stimare la quantità di acqua consumata settimanalmente usando le docce. I valori che abbiamo stimato hanno un ampio margine di variabilità, poiché non possiamo sapere con esattezza quanti allievi fanno la doccia dopo la lezione oppure quanto tempo impiegano per fare una doccia.

Quantità di classi	30
Lezioni settimanali	2 lezioni (2h+1h) = 1,5 docce/settimana a testa
Utilizzo settimanale scolastico	Da 4 a 10 persone/classe
Utilizzo settimanale esterno	• 5 serate a settimana • 3 palestre occupate • 3 turni per palestra • 20 utenti per turno 900 persone in totale = 900 docce
Docce totali settimanali	$30 \cdot 4 \cdot 1,5 + 900 = 1080$ $30 \cdot 10 \cdot 1,5 + 900 = 1350$ Possiamo valutare un totale di 1000-1200 docce a settimana, approssimato per i calcoli a 1100
Consumo acqua/doccia	30 l scaldati da 15 a 60°C (da 288,15 K a 333,15K), verranno successivamente miscelati con acqua dell'acquedotto (per un totale di 60 l a doccia)
Consumo settimanale di acqua	$30 \cdot 1100 = 33'000 \pm 300$ litri a settimana di acqua a 60°C
Energia utilizzata a settimana [J]	$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 4186 \cdot 33'000 \cdot (333,15 - 288,15) = 6,216 \cdot 10^9 J$
Energia utilizzata [kWh]/settimana	$Q = \frac{6,216 \cdot 10^9 J}{3,6 \cdot 10^6 \frac{J}{kWh}} = 1726,7 kWh$

5.2 Progettazione e dimensionamento dell'impianto

Dopo aver stimato i dati abbiamo organizzato un incontro con Gabriele Geronimi della ditta *ALTERSOL S.A.*, specializzata in impianti solari (sia fotovoltaici che termici). L'ingegnere ci ha proposto un possibile intervento di risanamento, che prevede la costruzione di un impianto solare termico per il riscaldamento dell'acqua sanitaria delle docce. L'installazione ipotizzata prevede di posizionare i pannelli solari termici sul tetto della palestra e di collegarli a due boiler di 3000 l di volume, per un totale di 6000 l corrispondente ca. ad 1/5 del consumo settimanale.

L'acqua del primo boiler è la prima ad essere riscaldata perché è quella che viene impiegata nell'uso quotidiano. Dato che in un edificio come il liceo l'acqua sanitaria è costantemente utilizzata senza possibilità di stagnare, il progetto prevede di concentrare il calore ottenuto proprio nel boiler che contiene quest'acqua. Visto che sostanzialmente è l'acqua del primo boiler a venire utilizzata quotidianamente, il dimensionamento dell'impianto corrisponde solamente al 10 % del consumo totale settimanale.

Il secondo boiler serve a immagazzinare calore durante il weekend, ovvero quando l'acqua sanitaria è stagnante e può riscaldarsi maggiormente. Questo permette di avere una quantità di acqua calda doppia a inizio settimana. Il passaggio del trasferimento di calore dai collettori al secondo boiler avviene quando la temperatura dell'acqua nel primo boiler raggiunge i 60°C.

Durante l'utilizzo, l'acqua presa da entrambi i boiler passa attraverso uno scambiatore a placche, cioè un dispositivo che permette di miscelare l'acqua calda del boiler con acqua più fresca (ca. 15°C), proveniente direttamente dall'acquedotto, in modo da raffreddarla fino alla temperatura desiderata.

Per riscaldare 1000 l di acqua sanitaria sono necessari 12 m² di pannelli, ovvero 5 moduli di 2,4 m² di superficie. Di conseguenza il nostro impianto da 6000 l necessita di 30 moduli, per una superficie totale 72 m².

Portando il numero di pannelli a 50, per aumentare l'apporto solare di energia dal 10 % al 16,7 %, si estende la superficie dell'impianto a 120 m². In Ticino l'insolazione annuale permette di accumulare, con un impianto solare termico, dai 600 ai 700 kWh per ogni m² di pannello in un anno. Il nostro impianto arriverebbe in questo modo a produrre 84'000 kWh all'anno. Sapendo che 1 m³ di gas corrisponde a 10.8 kWh di energia, la quantità di gas che si risparmierebbe annualmente è pari a: 7'777,77 m³ (15 tonnellate di CO₂). Il costo dei collettori è circa 660 CHF/m², per una spesa di 79'200 CHF. Il costo dei 2 boiler da 3000 l è 6500 CHF ciascuno, ovvero 13'000 CHF. In più si aggiungono i costi delle tubature per il trasporto del fluido (70 CHF/m) per una lunghezza di 100 m, dal momento che le palestre distano circa 50 m dal locale riscaldamento e bisogna compiere il tragitto due volte. Per le tubature si spendono quindi 7000 CHF. Il costo totale dell'installazione sarebbe pari a 99'200 CHF.

Il risparmio annuale sarebbe pari a 5189 CHF e quindi l'investimento verrebbe recuperato in 19,1 anni.

5.3 Consumo effettivo di gas: confronto con le stime

Per ottenere il consumo effettivo di gas dovuto al riscaldamento di acqua calda sanitaria abbiamo rilevato i valori riportati sul contatore con cadenza settimanale. Nel periodo estivo infatti il riscaldamento del liceo è spento e la caldaia viene accesa solo per riscaldare l'acqua delle docce.

La tabella seguente riporta i valori dei dati misurati e il consumo settimanale di gas per tali misurazioni.

26 maggio	316'099 m ³	
2 giugno	316'661 m ³	$\Delta\text{Volume} = 562 \text{ m}^3$
10 giugno	317'269 m ³	$\Delta\text{Volume} = 608 \text{ m}^3$

Il volume medio di gas bruciato settimanalmente vale 585 m³ (1 tonnellata di CO₂), che corrispondono a 6318 kWh. Tuttavia, la caldaia dell'edificio liceale, ha un'efficienza dell'80 %, perciò l'energia usata per riscaldare l'acqua settimanalmente è di 5054,4 kWh. Inoltre bisogna tenere conto del fatto che tra le caldaie e le docce delle palestre metà dell'energia dell'acqua calda nei tubi viene dispersa a causa dello scambio termico con l'ambiente, dovuto alla cattiva isolazione delle condotte. Di conseguenza l'apporto energetico settimanale alle docce è di 2572,2 kWh.

La quantità di acqua riscaldata ogni settimana va calcolata con il principio di termodinamica secondo il quale $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$. Q è l'energia che abbiamo ricavato dai passaggi precedenti, ΔT è la variazione di temperatura dell'acqua dovuta al processo di riscaldamento, che come abbiamo visto è (333,15 – 288,15), cioè 60–15 [°C]. Per questa formula, la massa dell'acqua riscaldata ogni

settimana è $m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{9,25992 \cdot 10^9}{4186 \cdot (333,15 - 288,15)} \cong 49'158 \text{ kg}$. Visto che 1 kg di acqua corrisponde

ad 1 l, calcoliamo che a settimana vengono fatte 49'158/30 $\cong$ 1639 docce da 30 l ciascuna.

Si può notare che il consumo effettivo di acqua calda sanitaria è superiore del 50 % ca. per rapporto alla nostra stima (che prevedeva 1000-1200 docce a settimana).

In conclusione: il consumo settimanale di acqua è maggiore di quanto noi ci aspettassimo: questo è dovuto a parametri che inizialmente non avevamo preso in considerazione come l'efficienza della caldaia o l'isolazione delle tubature. Il nostro studio si è rivelato importante poiché ci ha permesso di riconoscere che non tutti i parametri sono trascurabili.

5.4 Consumo estivo di gas

Annotando le cifre del contatore del gas tra giugno e settembre, abbiamo misurato il consumo estivo di gas della scuola. Secondo le nostre stime esso doveva essere quasi nullo, dal momento che nessuno impiega le docce e il riscaldamento non è in funzione. La misurazione del 10 giugno dava 317'269 m³ di gas consumati, mentre quella del 14 settembre indicava 323'821 m³. A queste due date bisogna aggiungere una settimana di consumo a giugno, dal momento che la scuola è terminata il 17, e 2 settimane di consumo a settembre, dal momento che la scuola è iniziata il 30 agosto. Per queste tre settimane in più abbiamo assunto che il consumo in media fosse uguale a quello già calcolato per giugno e che corrispondesse a 547 m³ a settimana. È quindi possibile calcolare il consumo settimanale estivo: 323'821 - 317'269 = 6552 m³ di gas, a cui bisogna togliere tre settimane di consumo scolastico. Abbiamo quindi 4911 m³ di gas estivo, da dividere in undici settimane di vacanza, che significa 446,5 m³ di gas (893 kg di CO₂) a settimana nel periodo estivo. Ovviamente questo è un dato altissimo, pensando soprattutto al fatto che in quel periodo a scuola non c'è nessuno. La spiegazione di questo consumo spropositato ci è stata fornita dal signor Edo Cardinali, custode della scuola, che ci ha detto che la caldaia, essendo danneggiata, non può essere spenta poiché non si riuscirebbe più a riaccenderla, e per questo motivo essa continua a scaldare e soprattutto a far circolare l'acqua calda nei tubi anche durante il periodo estivo.

Abbiamo quindi un altro elemento su cui poter intervenire per diminuire il consumo del liceo. Infatti una simile “perdita” di gas costa ogni anno 3277 CHF: da tenere in considerazione, dal momento che non sono impiegati per un riscaldamento utile al liceo.

Grazie a questo consumo possiamo calcolare anche un altro dato: il flusso di acqua che passa ogni secondo nelle tubature: sappiamo infatti che tra l’acqua di andata e quella di ritorno c’è un 1 °C di differenza. Quindi: 446 m^3 di gas corrispondono a $446 \cdot 10,8 \cdot 3'600'000 = 1,734 \cdot 10^{10} \text{ J}$. Secondo la relazione $Q = cm\Delta T$, $m = Q/c \cdot \Delta T = 1,734 \cdot 10^{10} / 4186 \cdot 1 = 4'142'379 \text{ kg}$ a settimana. In una settimana ci sono 604'800 secondi. Perciò il flusso nelle tubature è pari a 6,85 kg/s. Si tratta di un numero piuttosto elevato, per cui è possibile pensare che non tutta l’energia utilizzata per riscaldare venga poi mantenuta all’interno dei tubi. Probabilmente una buona parte di essa viene dispersa durante il tragitto, provocando così la variazione tra temperatura di andata e di ritorno.

5.5 Confronto dei consumi con un’abitazione monofamiliare

Innanzitutto, dalle bollette di AIL riguardanti il costo del gas utilizzato per il riscaldamento, possiamo ricavare il consumo effettivo di gas nell’arco di un anno. Dobbiamo però far notare che l’unica bolletta che ci è stata fornita risale al 2000. Il costo di quell’anno era di 73'000 CHF: in base alle informazioni di AIL (1 UC = 0,06 CHF, 1 UC = $1 \text{ m}^3 \cdot 11,12$) possiamo dedurre che il liceo utilizza annualmente ca. $109'412 \text{ m}^3$ di gas. Dividendo questa quantità per dodici otteniamo una media mensile approssimativa (in realtà nei mesi estivi il consumo è molto più basso, praticamente nullo, mentre in quelli invernali è più alto), pari a 9117 m^3 al mese (18 tonnellate di CO_2).

Vogliamo ora confrontare i dati di consumo del nostro liceo con quelli di una casa monofamiliare, di lato 16x15 m, alta 3 m, abitata da 4 persone.

	Casa	Liceo
Persone	4	600
Superficie di scambio [m^2]	666	10'724
Volume [m^3]	750	30'508
Consumo mensile di gas [m^3]	223	9117
Spesa annuale in gas [CHF]	1800	73'000
Fabbisogno mensile di energia [MJ/m^2]	$223 \cdot 10,8 \cdot 3,6 / 666 = 13$	$9117 \cdot 10,8 \cdot 3,6 / 10'724 = 33$

Come si può vedere dal confronto, una casa monofamiliare necessita di meno energia per ogni m^2 di superficie rispetto al liceo. Questa differenza è principalmente dovuta alle grandi perdite del riscaldamento e delle docce nella scuola. Infatti al liceo gli allievi utilizzano molta acqua calda per le docce e può anche accadere che più docce rimangano accese per tutta la durata della notte, se non di più, a causa delle dimenticanze degli allievi. A casa invece ogni persona che vi risiede fa in media una doccia al giorno e soprattutto non c’è il rischio che una doccia rimanga accesa tutta la notte. Inoltre la distanza tra caldaia e docce è molto più lunga per il liceo che per la casa. Più

distanza da coprire significa maggiori perdite lungo il tragitto, per cui se si vorrà avere una certa temperatura dell'acqua, l'energia da impiegare per il riscaldamento dell'acqua sanitaria sarà molta di più.

Questi elementi insieme fanno sì che l'energia impiegata per riscaldare l'acqua sia in proporzione molto più alta per il liceo che per la casa. Un altro aspetto riguarda gli spazi da riscaldare: essi sono molto più vasti al liceo, per cui in proporzione la percentuale di gas che si impiega per riscaldare del liceo sarà più alta che quella della casa. Con questi dati è quindi possibile comprendere come un intervento di risanamento di un edificio come quello del liceo sia da incentrare principalmente sul mantenimento dell'energia prodotta tramite il riscaldamento all'interno dell'edificio. Per cui le operazioni da effettuare consisteranno principalmente nel migliorare la coibentazione delle superfici di contatto (pareti e finestre). Lo stesso discorso può essere fatto per una casa monofamiliare, tuttavia per questo tipo di costruzione risulta molto più semplice coprire una percentuale più alta del fabbisogno energetico, per cui si può intervenire installando collettori o sonde geotermiche per diminuire il suo impatto energetico.

6. Conclusioni

In questo lavoro abbiamo studiato: alcune delle applicazioni più diffuse delle energie rinnovabili con i loro vantaggi e svantaggi; la teoria di calcolo necessaria a stabilire i consumi di un edificio sia per le pareti che per le finestre; l'applicazione pratica e concreta dei concetti appresi tramite lo studio del nostro edificio liceale.

Oggi le fonti di energie rinnovabili sono ampiamente utilizzabili nel riscaldamento o nell'apporto di energia elettrica di un'abitazione. Durante la realizzazione di questo lavoro, sono però emersi anche dei limiti: il primo è quello dei costi. Questo tipo di impianti richiedono un investimento iniziale maggiore che una caldaia a gas o a nafta. L'entità di questi problemi è però in calo: il rendimento di queste tecnologie è in costante aumento (per esempio il rendimento dei pannelli fotovoltaici) mentre i prezzi sono in continuo calo. In più con il passare del tempo i costi di consumo annuo sono molto più bassi per una pompa di calore rispetto alla caldaia. Questi fattori dovrebbero aumentare il numero di impianti ad energia rinnovabile (per il paragone dei costi si veda la tabella a p. 12).

Abbiamo avuto difficoltà nell'applicazione pratica del calcolo del dispendio energetico perché non è stato semplice trovare i materiali che componevano le pareti. Secondo quanto calcolato, emerge chiaramente che lo stabile liceale presenta delle grosse falle nell'isolazione. Le perdite di energia raggiungono quindi livelli notevoli. Tuttavia è possibile intervenire in diversi modi, con risultati più o meno vantaggiosi.

I tipi di intervento si suddividono principalmente in due tipologie: l'intervento mirato a migliorare l'apporto di calore (riscaldamento) e quello a migliorare il trattenimento del calore (isolazione). Per la prima tipologia è stato considerato un impianto a collettori solari di 120 m² per sostituire un consumo di 7'777 m³ di gas ogni anno. Il tempo di recupero si aggira intorno ai 19 anni. È sicuramente un tempo di recupero interessante, tuttavia questo impianto va a coprire solamente il 10 % del fabbisogno di acqua calda delle palestre.

Per la seconda tipologia di intervento, le modifiche possibili sono due: aumento del cappotto isolante o sostituzione delle finestre. La prima soluzione è sicuramente da escludere dal momento che i tempi di recupero sono di circa 147 anni per le aule e 250 anni per le palestre. La seconda soluzione è invece la più interessante di tutte quelle proposte. La sostituzione è prevista con dei doppi vetri termoisolanti. I tempi di recupero sono di 16 anni per le aule e 27 per le palestre. I tripli vetri hanno un tempo di recupero troppo lungo (circa 50 anni). Sostituendo tutte le finestre in una volta si risparmierebbero 342'838,2 kWh ogni anno (63 tonnellate di CO₂), ovvero 21'182 CHF, per un costo totale di 412'965 CHF, che viene recuperato in 19,5 anni. L'alto risparmio energetico e il suo tempo di ritorno rendono la sostituzione delle finestre di tutto il complesso liceale l'operazione di risanamento più interessante.

Come tutti risanamenti energetici, un tale investimento ha delle ripercussioni positive sull'economia locale dal momento che sono necessarie delle imprese di costruzioni locali per effettuare le sostituzioni. Inoltre, il risparmio energetico ricavato dalla sostituzione sarebbe un primo passo verso l'indipendenza energetica ma anche verso la diminuzione delle immissioni di CO₂ nell'atmosfera.

Bibliografia telematica

Pagina frontale

<<http://www.sky-wallpaper.com/uploads/2010-05/high-definition-earth-scenery-wallpaper/1274665785-MLLXXEM.jpg>>

2. Energie rinnovabili e alternative

Wikipedia: energie rinnovabili
<http://it.wikipedia.org/wiki/Energie_rinnovabili>

Wikipedia: energie alternative
<http://it.wikipedia.org/wiki/Energie_alternative>

Figura 2.1: Ufficio Federale di Statistica
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00764>

Figura 2.2: US energy Information Administration
<http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/pdf/pages/sec10_2.pdf>

2.3 Geotermia

Wikipedia: geotermia
<<http://it.wikipedia.org/wiki/Geotermia>>

Gabriele Cesari: "Introduzione alla geotermia, parti 1 e 2"
<<http://www.geo-net.it/index.php?section=download&file=eNorKE3KyUzWL8oszi8qTtUPKEotTsOrSa zKzM9LVUhPzS9JLcrNTFTQVTDcoFCQWFSSqleQkgYALe0UGw==>>
<<http://www.geo-net.it/index.php?section=download&file=eNorKE3KyUzWL8oszi8qTtUPKEotTsOrSazKzM9LVUhPzS9JLcrNTFTQVTDcoFCQWFSSqleQkgYALfkUHA==>>

Arturo Romer, Paola Caputo, Vinicio Curti: "La pompa di calore"
<<http://www.elettricità.ch/downloads/files/pdf/La%20pompa%20di%20calore%20%28Caputo,Romer,Curti%29%20giugno%202004.pdf>>

Figura 2.3: funzionamento di una pompa di calore
<<http://www.ideaservicere.com/wp-content/uploads/2009/04/geotermia.bmp>>

Figura 2.4: ciclo termodinamico della pompa di calore.
<http://www.vegaenergy.net/immagini/geo/GRAFICO_POMPAdiCalore.jpg>

Figura 2.5: sonde geotermiche orizzontali

<http://www.casainnovativa.com/wordpress/wp-content/uploads/2009/03/wp-erdregister-600x700-257x300.jpg>

Figura 2.6: sonde geotermiche verticali

<http://www.casainnovativa.com/wordpress/wp-content/uploads/2009/03/wp-sonden-600x700-257x300.jpg>

Figura 2.7: sonde geotermiche di falda

<http://www.casainnovativa.com/wordpress/wp-content/uploads/2009/03/wp-wasser-600x700-257x300.jpg>

Figura 2.8: tabella del rendimento della geotermia

<http://www.ideaservicere.com/wp-content/uploads/2009/04/rendimento-sonde.bmp>

2.4 Solare termico

Wikipedia: solare termico

http://it.wikipedia.org/wiki/Solare_termico

Nicola Graniglia: "Solare termico"

<http://www.chim.unisi.it/basosi/didattica/SOLARE%20TERMICO.pdf>

Figura 2.9: impianto solare termico a circolazione naturale.

<http://www2.auxiliagest.it/wp-content/uploads/2009/01/schema-circolazione-naturale.jpg>

Figura 2.10: impianto solare termico a circolazione forzata.

http://www.ideaenergetica.it/images/pg024_1_01.jpg

Figura 2.11: collettori solari non vetrati

<http://www.machsources.com/productimages/12654/solar-heating.jpg>

2.5 Solare fotovoltaico

Wikipedia: modulo fotovoltaico

http://it.wikipedia.org/wiki/Modulo_fotovoltaico

Wikipedia: impianto fotovoltaico

http://it.wikipedia.org/wiki/Impianto_fotovoltaico

Figura 2.12: cella fotovoltaica monocristallina

http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090220/166056/kw090219gin02.JPG

Figura 2.13: cella fotovoltaica "thin film"

<http://www.alt-energy.info/wp-content/uploads/2009/09/MWT2.jpg>

Figura 2.14: andamento dei prezzi dei moduli fotovoltaici

http://www.solarbuzz.com/sites/default/files/facts_figs/modules_trend_04.png

Costi dell'elettricità:

http://peswiki.com/index.php/Directory:Cents_Per_Kilowatt-Hour

<http://www.2000watts.org/index.php/energytrend/nucleaire/nucleaire-prix/356-combien-coute-un-kwh-deelectricite-nucleaire.html>

3. Teoria sulla conduzione termica

Svizzera Energia: "Calcolo del coefficiente U e catalogo degli elementi costruttivi per nuovi edifici"

http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=it&name=it_356959762.pdf

Appendice: posizione del Sole, potenza del flusso solare ed energia erogata dal pannello

Figura 1.1: angoli che descrivono la posizione del Sole

http://www.google.ch/imgres?imgurl=http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/azelzen.gif&imgrefurl=http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/glossary.html&usq=JSJ0fDD1O7JqBEASHk5kffzdH5E=&h=470&w=592&sz=9&hl=it&start=0&sig2=1W1ZKWM5gC1kcpTc4eu28g&zoom=1&tbnid=Y_E5K2GEE04pEM:&tbnh=154&tbnw=194&ei=5RR6Tf_2JsSBOsSchPUG&prev=/images%3Fq%3Dazimuth%26um%3D1%26hl%3Dit%26client%3Dfirefox-a%26sa%3DN%26rls%3Dorg.mozilla:it:official%26biw%3D1296%26bih%3D644%26tbs%3Disch:1&um=1&itbs=1&iact=rc&dur=424&oei=5RR6Tf_2JsSBOsSchPUG&page=1&ndsp=17&ved=1t:429,r:4,s:0&tx=86&ty=75

Posizione del Sole nel cielo

<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>

Nozioni di base sull'irraggiamento solare

http://www.isaac.supsi.ch/isaac/energia%20nella%20costruzione/formazione/Formazione%20continua/Corso%20DADC%20E01%20-%20Basi%20di%20meteorologia/materiale%20corso/07_nozioni%20di%20base%20sull%27irraggiamento%20solare_testo.pdf

Copertura nuvolosa a Lugano

http://www.ti.ch/dfe/USTAT/DATI_CANTONE/02_territorio/tabelle/T_020301_02C.html

Geometria analitica alla base del calcolo dell'angolo di incidenza

http://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_riferimento

http://it.wikipedia.org/wiki/Piano_%28geometria%29

http://en.wikipedia.org/wiki/Dot_product

Rotazione di un piano nello spazio

[<http://www.kwon3d.com/theory/transform/rot.html>](http://www.kwon3d.com/theory/transform/rot.html)

[<http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/modeling/mod_tran/3drota.htm#Z>](http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/modeling/mod_tran/3drota.htm#Z)

Orientamento dei pannelli

[<http://en.wikipedia.org/wiki/Boxing_the_compass>](http://en.wikipedia.org/wiki/Boxing_the_compass)

Figura 4.3: cartina della radiazione solare e della produzione energetica in Svizzera

[<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eu_opt/pvgis_solar_optimum_CH.png>](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eu_opt/pvgis_solar_optimum_CH.png)

Figura 4.4: software PVGIS

[<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#)

Ringraziamenti

I nostri più sentiti ringraziamenti vanno a:

Professor Nicolas Cretton, per averci proposto questo lavoro, la motivazione, gli spunti di riflessione, il supporto, il tempo, la pazienza avuti e i contatti che ci ha fornito nella stesura del lavoro.

Signor Edo Cardinali, per tutte le informazioni tecniche riguardanti l'edificio del liceo.

Ingegnere Riccardo Arlunno, per l'aiuto nella risoluzione del problema del calcolo del consumo energetico del liceo.

Ingegnere Gabriele Geronimi, per averci fornito una possibile soluzione al problema del consumo di acqua calda sanitaria.

Professor Rino Rossinelli, per le nozioni di programmazione.

Professor Giancarlo Werner, per i dati dell'impianto della sua abitazione.

Signor Stéphane Cattin, per i dati dell'impianto della sua abitazione.

Santiago Navonne, per l'indispensabile aiuto nella stesura del programma per il calcolo del flusso solare.

Appendice: posizione del Sole, potenza del flusso solare ed energia erogata dal pannello

Come ulteriore argomento di ricerca per il nostro lavoro di maturità abbiamo ritenuto interessante studiare l'energia fotovoltaica, nei suoi aspetti più concreti, per poter valutare l'efficienza di un impianto da installare in un'abitazione. Lo studio si è basato sul flusso solare diretto. Abbiamo quindi stimato di trascurare la luce riflessa dall'ambiente sul pannello PV e abbiamo posto il pannello a Savosa (latitudine: $46^{\circ} 1' 20''$ N, longitudine: $8^{\circ} 57' 10''$ E) come se fosse orientato a sud e inclinato di 30° per rapporto all'orizzonte.

1. Posizione del Sole

Come primo passo abbiamo studiato la posizione del Sole nel cielo: il suo spostamento per rapporto al pannello comporta infatti una variazione del flusso solare sull'impianto.

Possiamo descrivere la posizione del Sole attraverso due angoli: l'elevazione e l'angolo azimutale. Il primo è l'altezza (in gradi) del Sole per rapporto al piano dell'orizzonte, mentre il secondo è l'angolo di rotazione del Sole attorno ai 4 punti cardinali. Nell'immagine che segue quest'ultimo è indicato per rapporto al nord, ruotando in senso orario; tuttavia, visto che abbiamo deciso di orientare a sud il nostro pannello, abbiamo preferito valutare l'angolo azimuth per rapporto al sud.

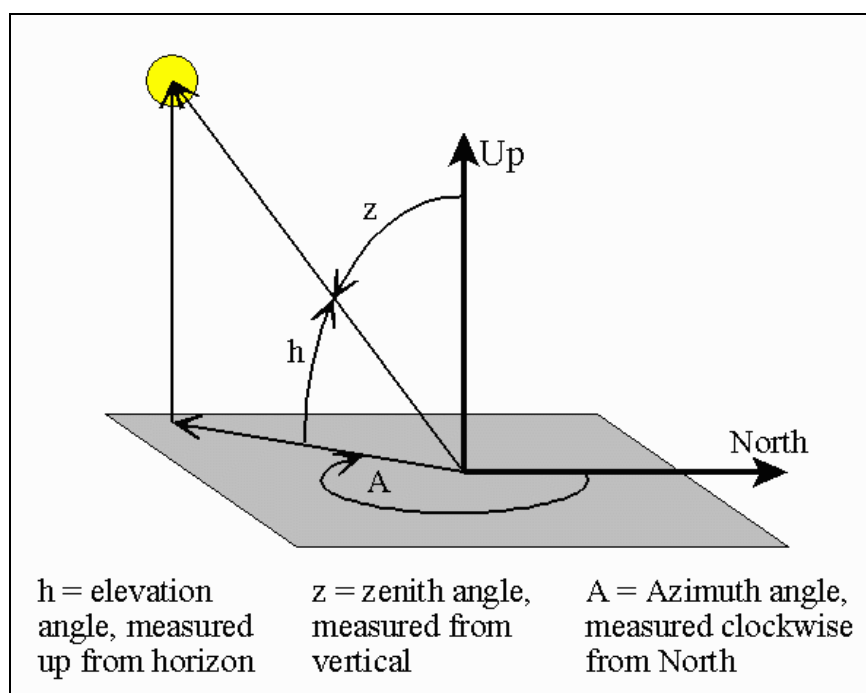


Figura 1: angoli che descrivono la posizione del Sole nel cielo.

Tramite la piattaforma di programmazione *DEV-C++* e formule di tipo matematico-astronomico abbiamo scritto un programma che ci permettesse di determinare la posizione del Sole ad un esatto momento nella giornata, per una precisa coordinata scelta arbitrariamente. Ripetendo quest'operazione minuto per minuto, attraverso le strutture-ciclo implementate nel programma, abbiamo tracciato il grafico della variazione posizione del Sole nel cielo per 4 giorni: i 2 solstizi (il 21 dicembre quello invernale e il 21 giugno quello estivo) e i 2 equinozi (21 marzo, 21 settembre). Il grafico seguente mostra i risultati ottenuti.

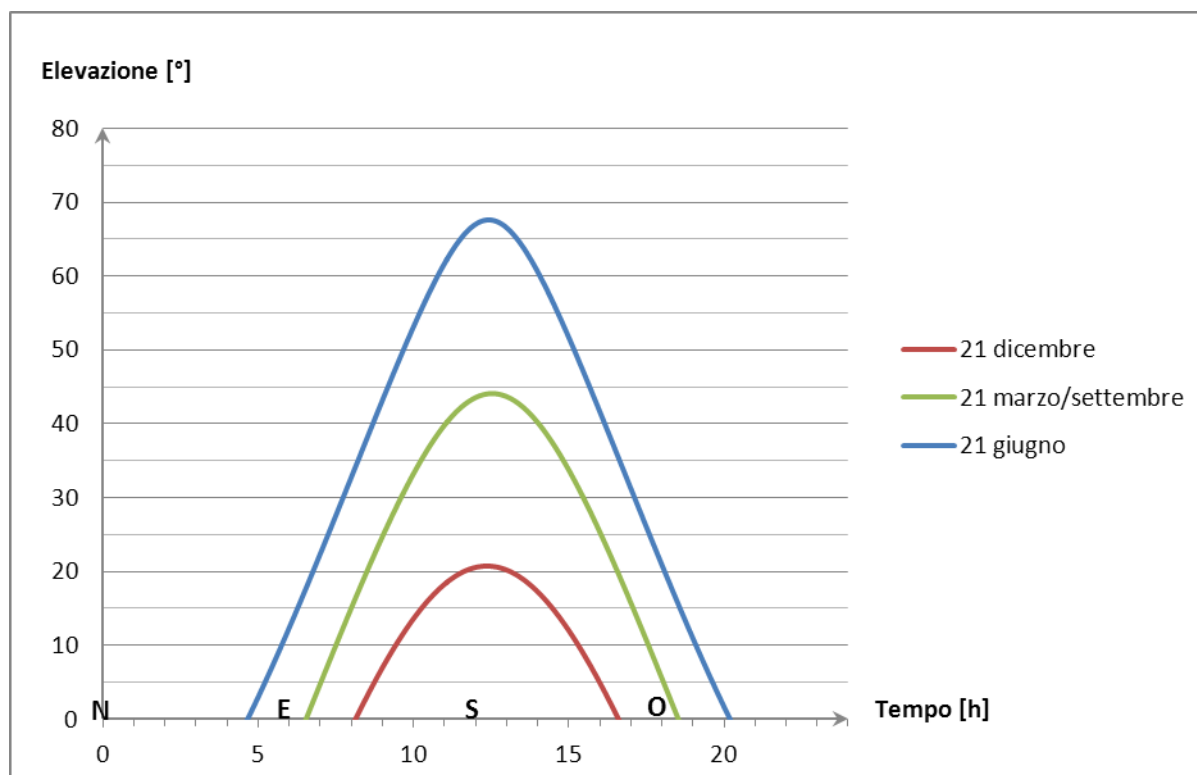


Figura 2: variazione dell'elevazione del Sole per rapporto all'orizzonte nel corso dell'anno.

Per essere certi della verosimiglianza dei risultati li abbiamo in seguito paragonati a quelli elaborati da un software dell'Università dell'Oregon, consultabile al seguente indirizzo internet: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>.

2. Flusso solare sul pannello PV

Sebbene nella zona di Lugano la potenza di picco del flusso solare valga ca. 1kWp/m^2 , la variazione della posizione del Sole rispetto al pannello provoca un conseguente mutamento dell'irraggiamento sul pannello nel corso del tempo.

Una volta determinata la posizione del Sole, tramite delle considerazioni di trigonometria sferica (che permettono di determinare le coordinate di un punto sulla sfera unitaria conoscendo elevazione e azimuth) e di geometria analitica (per determinare l'angolo di incidenza tra il flusso solare e il vettore normale al pannello), entrambe basate sullo stesso sistema di riferimento cartesiano, abbiamo potuto tracciare un grafico per paragonare l'andamento della potenza del flusso solare sull'impianto PV in funzione delle ore della giornata, per gli stessi giorni utilizzati nel paragrafo precedente. Sempre attraverso *DEV-C++* abbiamo implementato nel programma iniziale le funzioni necessarie a far calcolare il flusso in base al mutare della posizione.

Nel grafico 3 possiamo vedere che la variazione della potenza in giugno, settembre e marzo sono pressoché uguali: questo è dovuto al fatto che stimando l'inclinazione del pannello a 30° , dirigendo l'orientamento a sud e installando il modulo fotovoltaico alle coordinate di Savosa non abbiamo ottenuto la combinazione ideale affinché il flusso in tutto l'anno sia massimo in giugno (sebbene tra i 4 valori sia giugno quello con la produzione massima). Da notare che il flusso in dicembre è nullo fino al momento in cui il Sole sorge. Una volta che il pannello viene illuminato la potenza non aumenta esponenzialmente da 0 ma da ca. 275 kWp .

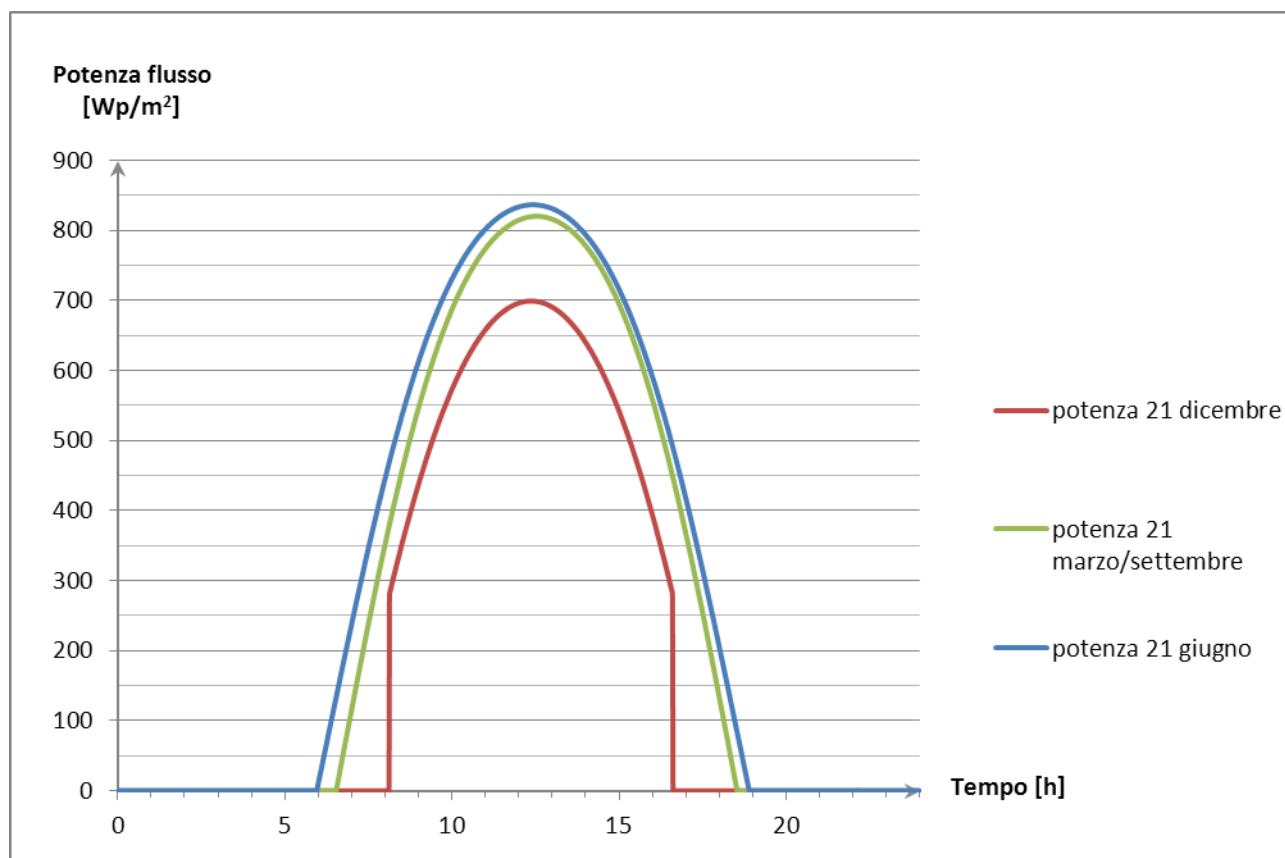


Figura 3: variazione della potenza dell'irraggiamento solare nel corso dell'anno.

3. Energia erogata dal pannello

Da ultimo, abbiamo tenuto conto di alcune considerazioni tecniche del modulo fotovoltaico per poter calcolare l'effettiva energia che esso riesce a convertire in energia elettrica durante l'arco della giornata. Innanzitutto, l'efficienza media di un pannello PV si aggira tra il 15 e il 20 %; secondariamente bisogna tener conto del fatto che in presenza di nuvole la produzione di energia è praticamente nulla. A Lugano la media annuale di nuvolosità è ca. del 50 % (fonte: Meteosvizzera), di conseguenza i valori che otteniamo saranno da dimezzare.

Dopo aver ottenuto l'energia di una giornata intera in kWmin dividiamo il suo valore per 60 in modo da convertirla in kWh .

Il grafico 3.1 mostra i risultati ottenuti. Come possiamo notare, paragonando i valori di giugno con quelli di marzo/settembre, possiamo vedere che sono leggermente maggiori perché, in relazione con il grafico del paragrafo precedente, il flusso è leggermente maggiore. I valori ottenuti tengono conto dell'efficienza del pannello ma non prendono in considerazione la percentuale di nuvolosità poiché si tratta di valori giornalieri.

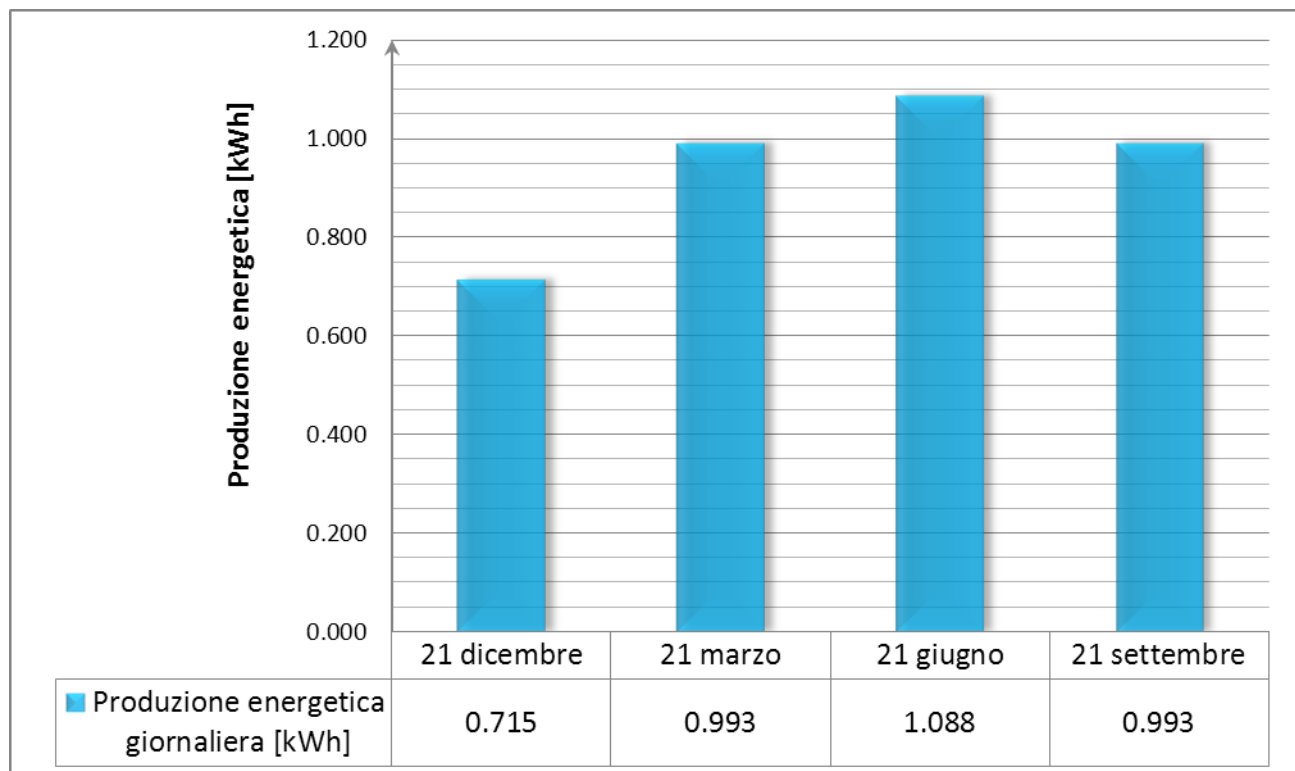


Figura 4: produzione energetica per i giorni 21 dicembre, 21 marzo, 21 giugno e 21 settembre a confronto.

Per avere un primo termine di paragone, abbiamo confrontato la produzione effettiva dei pannelli che il professor Nicolas Cretton ha affittato presso il Politecnico Federale di Losanna con quella calcolata dal programma *DEV-C++*. La tabella riassume i dati tecnici di questo impianto, i grafici 5 e 6 mostrano il paragone dei dati.

Latitudine e longitudine	46,5206 Nord; 6,5656 Est
Altitudine	372 m. s. l. m.
Inclinazione pannello per rapporto al suolo	17°
Orientamento azimutale (per rapporto al sud)	S, 0°
Superficie e potenza	6 m ² 1,38 kWp (max.)
Produzione effettiva per il 6 aprile	6,2 [kWh]
Produzione stimata per il 6 aprile (<i>DEV-C++</i>) [kWh]	5,9 [kWh]

Dai grafici 3.2 e 3.3 si vede che il valore di energia prodotta durante la giornata del 6 aprile combacia, nonostante l'andamento della produzione per unità di tempo sia leggermente diverso.

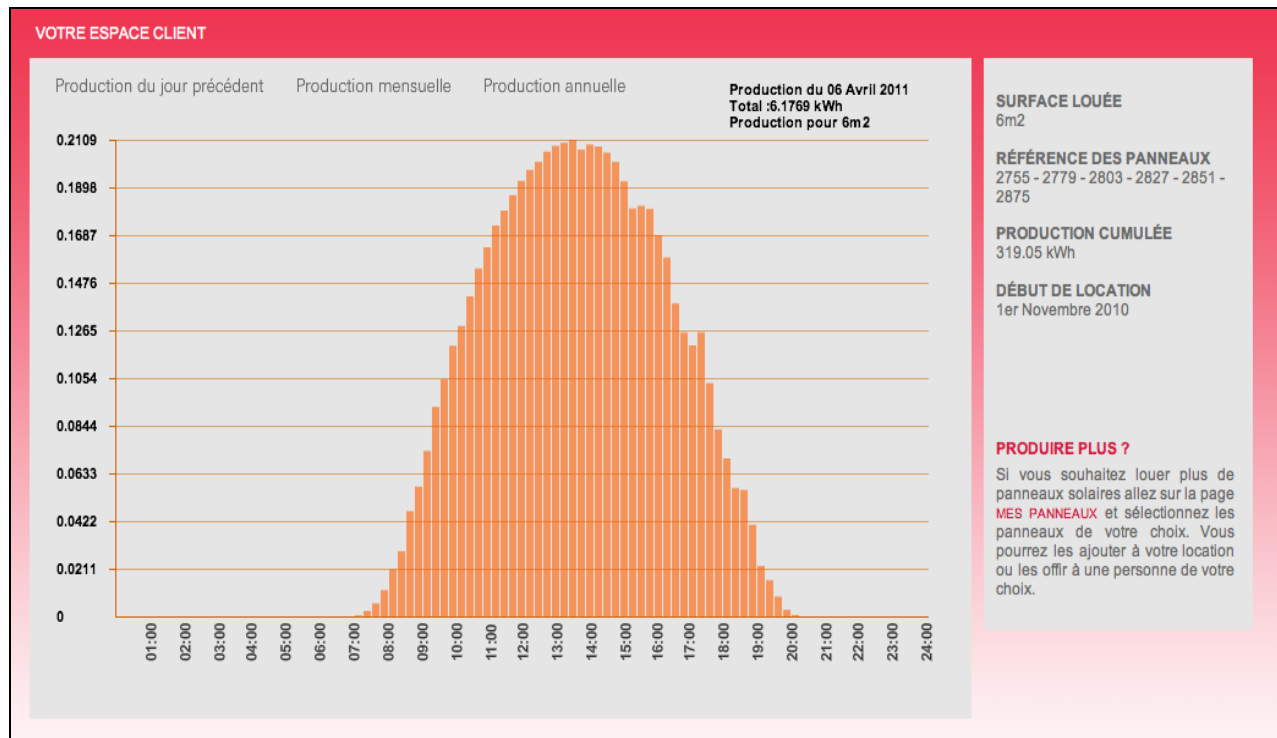


Figura 5: grafico della produzione energetica effettiva dell'impianto di Losanna, per il 6 aprile.

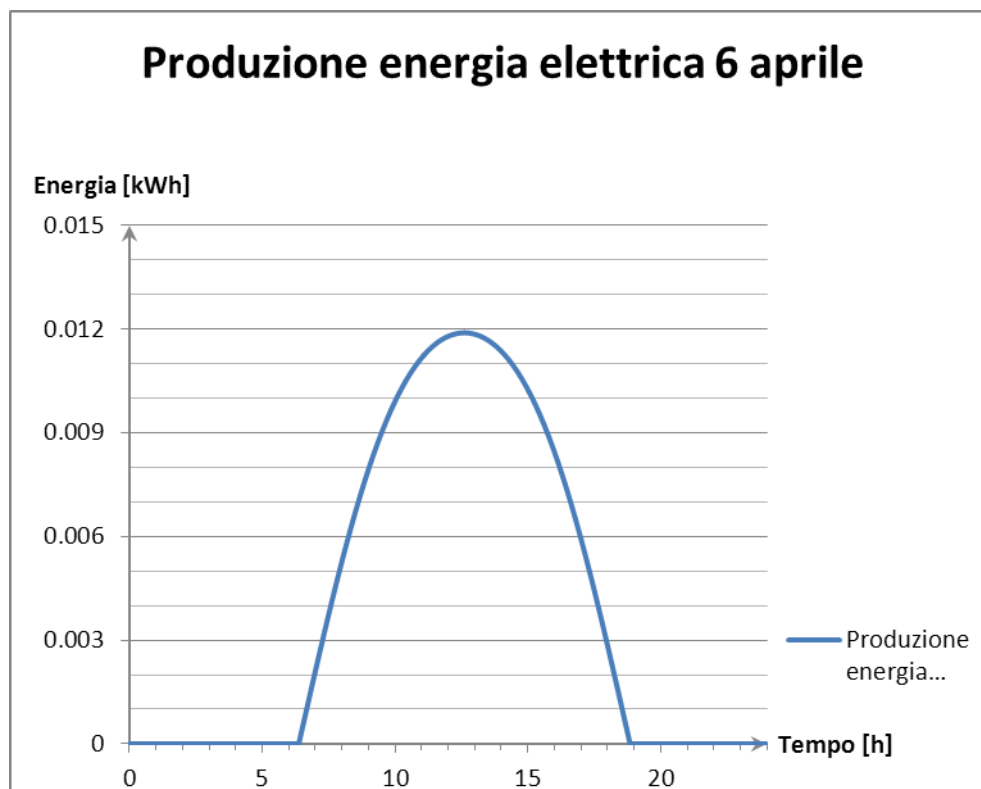


Figura 6: grafico della produzione energetica dell'impianto di Losanna, stimata con DEV-C++, per il 6 aprile.

Un altro studio che abbiamo ritenuto interessante fare è stato quello riguardante la produzione energetica sull'arco di un intero anno. Modificando gli intervalli di tempo dai singoli giorni a interi mesi, abbiamo potuto tracciare un istogramma simile al precedente che confronta la produzione mensile. In questi calcoli è presa in considerazione anche la nuvolosità media annuale, che dimezza i valori ideali.

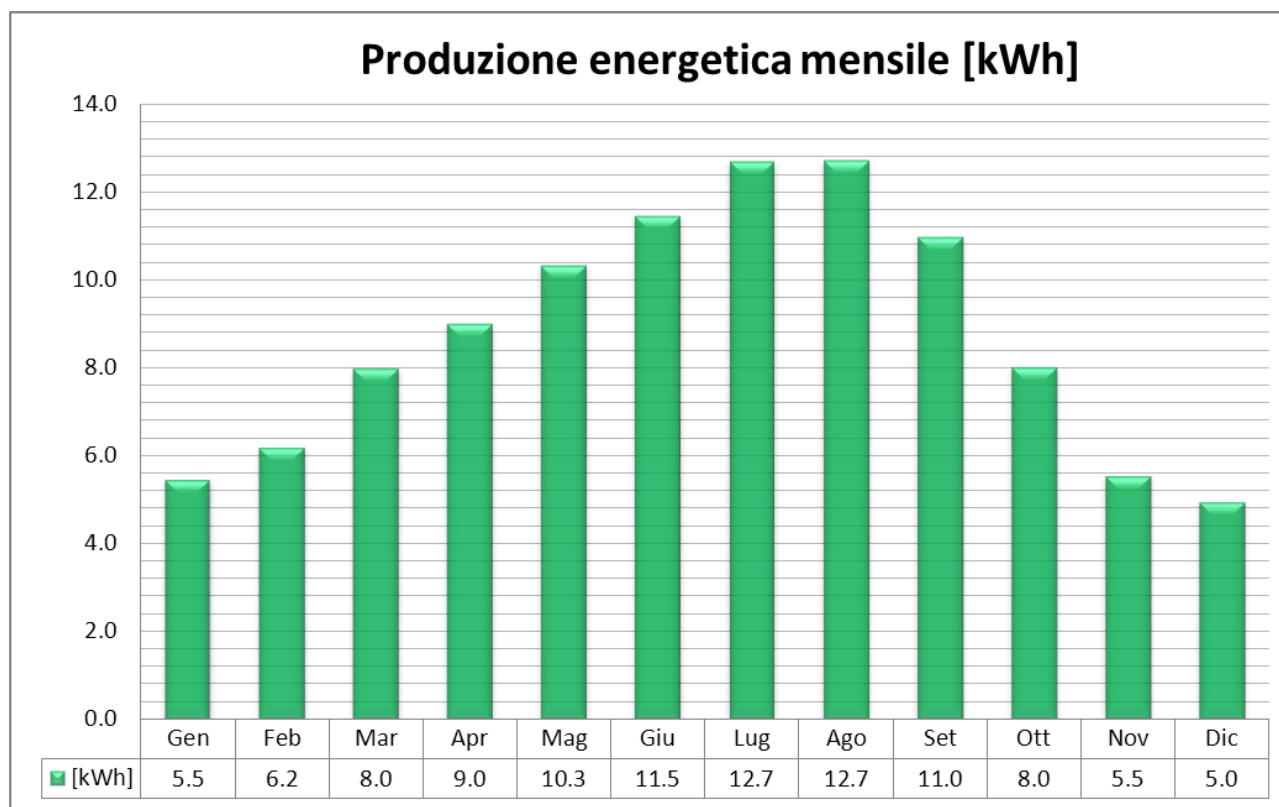


Figura 7: confronto tra le produzioni mensili calcolate dal programma *DEV-C++*.

Dal grafico a istogrammi possiamo inoltre calcolare la produzione energetica totale, cioè:

$$E_{\text{annuale}} \cong 105,4 \text{ kWh}$$

4. Impianti per case monofamiliari: confronti e valutazioni

Dopo aver studiato un impianto ipotetico situato sopra l'edificio del liceo, abbiamo ottenuto i dati di produzione reali di due installazioni fotovoltaiche, grazie alla disponibilità del professor Giancarlo Werner (impianto di Ponte Capriasca) e del signor Stéphane Cattin (impianto a Peseux, nei pressi di Neuchâtel).

Attraverso il programma scritto da noi in *DEV-C++* e il software PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) sviluppato dall'Institute for Energy, l'istituto di ricerca energetica dell'Unione Europea (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>) abbiamo poi paragonato i dati effettivi a quelli calcolati con l'informatica.

Nelle tabelle sono riassunte le caratteristiche tecniche degli impianti, mentre nei grafici vengono confrontati i valori calcolati con *DEV-C++*, PVGIS e quelli effettivi.

- **Moduli a Peseux**

Latitudine e longitudine	46°59'26" Nord; 6°53'18" Est
Altitudine	445 m. s. l. m.
Inclinazione pannello per rapporto al suolo	30°
Orientamento azimutale (per rapporto al sud)	W-SW, 71°
Superficie e potenza	37 m ² 4,8 kWp (0,13 kWp/m ²)

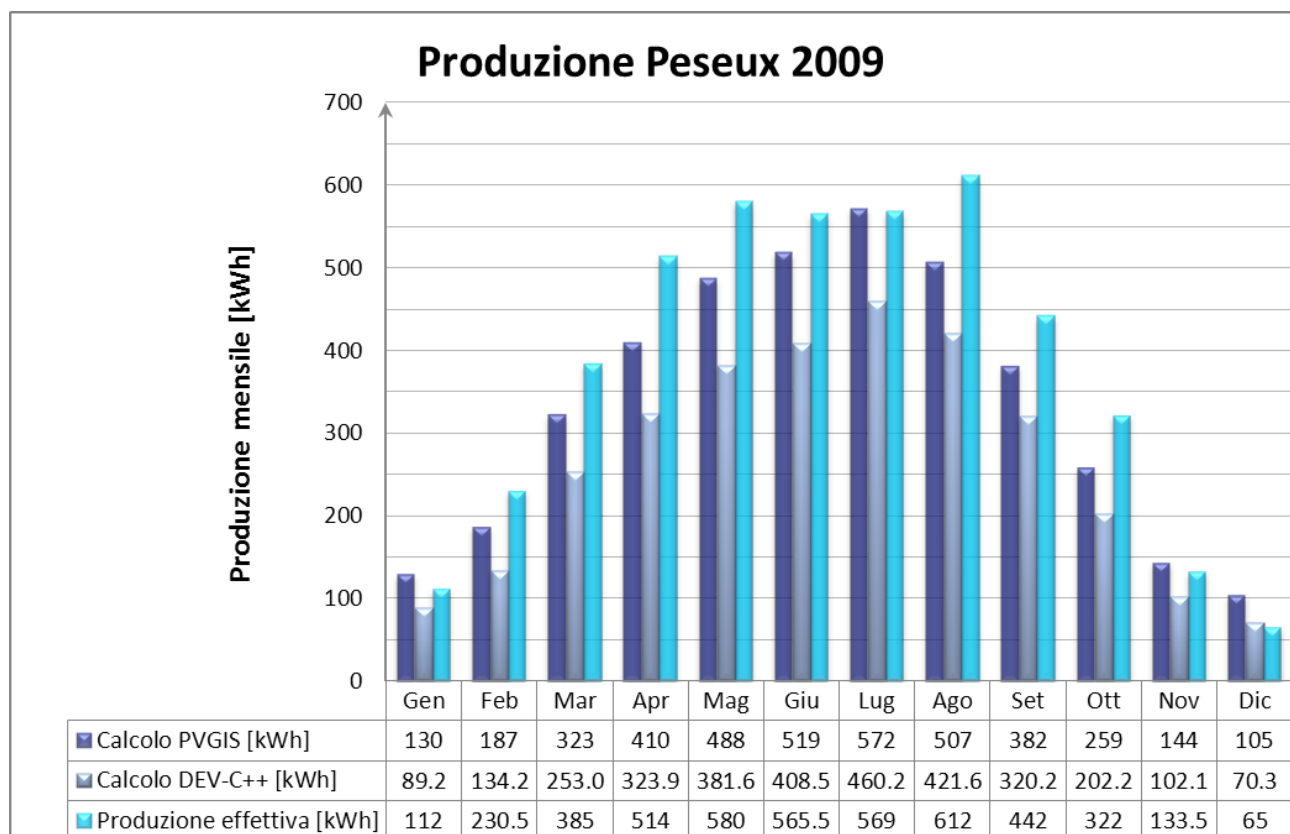


Figura 8: confronto tra le produzioni mensili [kWh] effettive del 2009, quelle calcolate con PVGIS e con DEV-C++ per l'impianto di Peseux.

Produzione effettiva di energia nel 2009: $E_{2009} = 4530,5$ kWh

Produzione calcolata con PVGIS: $E_{\text{PVGIS}} = 4026$ kWh

Produzione calcolata con DEV-C++: $E_{\text{DEV-C++}} = 3167$ kWh

- **Moduli a Ponte Capriasca**

Latitudine e longitudine	46°3'36" Nord; 8°56'54" Est
Altitudine	450 m. s. l. m.
Inclinazione pannello per rapporto al suolo	30°
Orientamento azimutale (per rapporto al sud)	SbW, 10°
Superficie e potenza	- 16 m ² - 2,1 kWp (0,13 kWp/m ²)

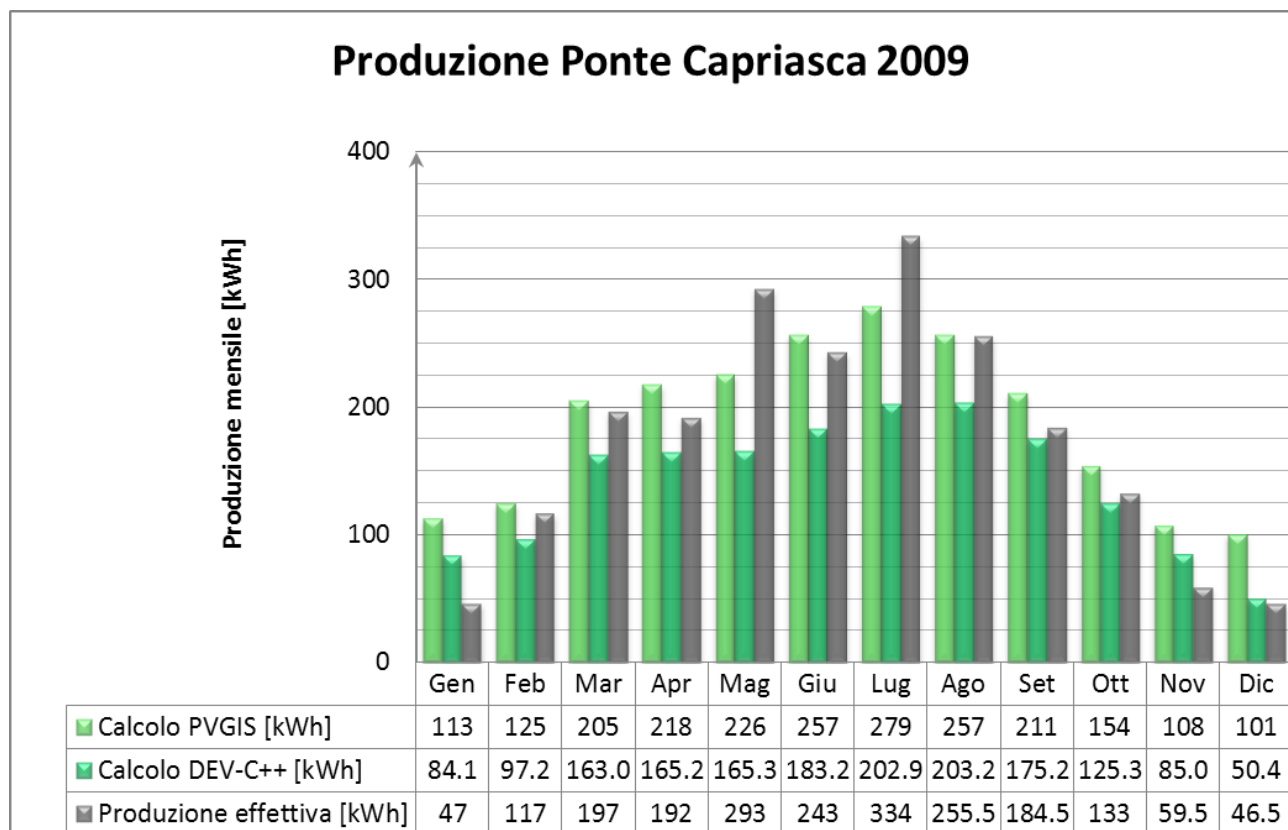


Figura 9: confronto tra le produzioni di energia [kWh] mensili effettive del 2009, quelle calcolate con PVGIS e con DEV-C++ per l'impianto di Ponte Capriasca.

Produzione effettiva di energia nel 2009:

$$47 + 117 + 197 + 192 + 293 + 243 + 334 + 255,5 + 184,5 + 133 + 59,5 + 46,5 = 2102 \text{ kWh}$$

Produzione calcolata con PVGIS:

$$113 + 125 + 205 + 218 + 226 + 257 + 279 + 257 + 211 + 154 + 108 + 101 = 2254 \text{ kWh}$$

Produzione calcolata con DEV-C++:

$$84,1 + 97,2 + 163 + 165,2 + 183,2 + 202,9 + 203,2 + 175,2 + 125,3 + 85 + 50,4 = 1540,2 \text{ kWh}$$

Paragonando i risultati ottenuti possiamo notare alcune importanti differenze. Il programma scritto da noi fornisce i dati meno precisi, seppure mantengano un andamento corretto nel corso dell'anno: esso infatti non tiene conto delle perdite di energia dovute alla temperatura del pannello, all'umidità dell'aria oppure alla riflessione della luce nell'ambiente. Nei nostri calcoli ci siamo basati solamente sulla posizione del Sole nel cielo e sulla percentuale di nuvolosità durante l'anno.

Anche il programma PVGIS, sebbene abbia generato dati con minore scarto per rapporto a quelli effettivi, non è sempre esatto.

Svolgere questo studio ci è stato utile per diversi motivi. Non solo abbiamo approfondito le nostre conoscenze nell'ambito della posizione del Sole: abbiamo anche valutato diversi modi per stimare quella che è la produzione energetica di un impianto fotovoltaico e ne abbiamo confrontato i fattori che la condizionano, come ad esempio la meteorologia. Durante la programmazione abbiamo anche approfondito alcune conoscenze matematiche e informatiche senza le quali non avremmo potuto trovare le formule per poter determinare la posizione del Sole, l'irraggiamento del pannello e la sua produzione energetica. I dati che ci sono stati forniti da Giancarlo Werner e da Stéphane Cattin ci hanno inoltre permesso di quantificare quello che è il fabbisogno energetico di un'abitazione monofamiliare.

I dati di dimensionamento dei due impianti e di energia prodotta sono messi in relazione nella seguente tabella al fine di poter trarre qualche paragone quantitativo:

	Dimensione [m ²]	Potenza [kWp]	Produzione di energia [kWh/anno]
Peseux	37	4,8	≈ 4500
Ponte Capriasca	16	2,1	≈ 2100

Dai dati di potenza e produzione di energia possiamo vedere che, come rapporto indicativo, 1 kW di potenza produce ca. 1000 kWh di energia all'anno.

Dai dati di potenza e superficie, possiamo dedurre che mediamente un impianto ha una potenza di ca. 0,13 kWp/m², ovvero 130 Wp/m².

Per quanto riguarda il rapporto produzione-potenza, possiamo vedere che esso combacia con la seguente cartina della Svizzera, che riporta in gradazioni di colore la quantità di energia prodotta da un impianto da 1 kWp nelle varie regioni del territorio.

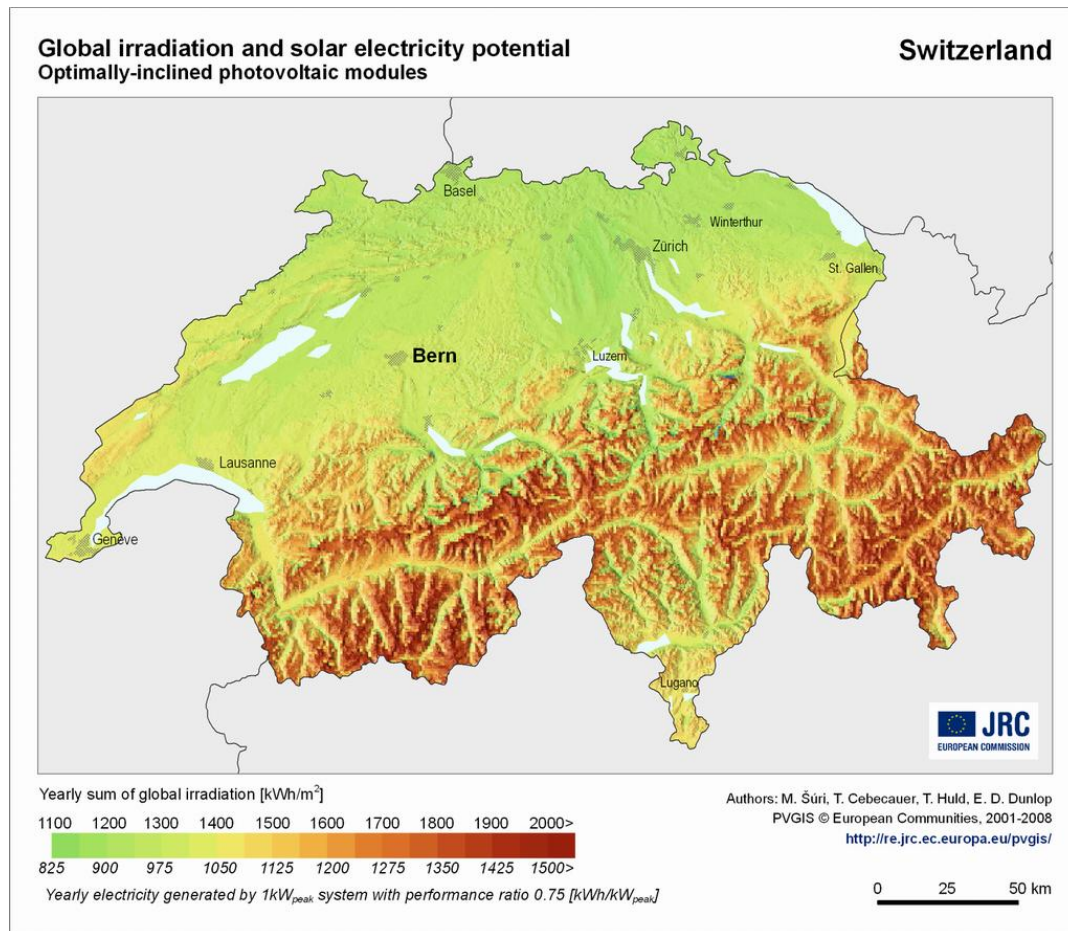


Figura 10: variazione dell'irraggiamento solare [kWh/m²] e della produzione annuale di energia attraverso un impianto di 1 kWp.

Abbiamo inoltre allegato della schermata del software PVGIS, nella quale inserire i dati per calcolare l'energia prodotta dall'impianto.

PV Estimation Monthly radiation Daily radiation

Performance of Grid-connected PV

NOTE: new version of PVGIS available [here](#).
[Read about it.](#)

PV technology: Crystalline silicon

Installed peak PV power 4.8 kWp

Estimated system losses [0;100] 14 %

Fixed mounting options:

Mounting position: Free-standing

Slope [0;90] 30 ☐ Optimize slope

Azimuth 71 ☐ Also optimize azimuth

(Azimuth angle from -180 to 180, East=-90, South=0)

Tracking options:

☐ Vertical axis Slope [0;90] 0 ☐ Optimize

☐ Inclined axis Slope [0;90] 0 ☐ Optimize

☐ 2-axis tracking

Output options

☐ Show graphs ☐ Show horizon

☒ Web page ☐ Text file ☐ PDF

Calculate [\[help\]](#)

Figura 11: screenshot di PVGIS.