

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA

PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

D.I.E.M.

*Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni,
Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia*

TESI DI LAUREA

in
Macchine L

Rivisitazione di un edificio passivo in Sicilia sul modello tedesco

CANDIDATO:
Luca BARBUSCA

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Ing. Giovanni NALDI

Anno Accademico 2008-09

Sessione II

Indice	pag. 1
Capitolo 1 PASSIVHAUS	pag. 4
1.1 Perché costruire case passive	pag. 5
1.1.1 Definizione dello standard casa passiva	pag. 6
1.1.2 Cosa rende un edificio casa passiva	pag. 8
1.1.3 L'orientamento	pag. 9
1.1.4 Ombreggiamento	pag. 9
1.1.5 Rapporto tra superficie e volumetria	pag. 9
1.1.6 La disposizione dei locali	pag. 9
1.1.7 L'involucro: gli elementi costruttivi e una finestra per edifici passivi in Italia	pag. 10
1.1.8 L'isolamento termico	pag. 11
1.1.9 La questione degli extra spessori	pag. 13
1.1.10 L'assenza di ponti termici	pag. 13
1.1.11 L'impermeabilità al vento	pag. 13

Capitolo 2 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO E DELLO STUDIO DI SIMULAZIONE

2.1 Studio casa passiva in Sicilia	pag. 15
2.1.1 Identificazione del luogo di progettazione dell'involucro	pag. 15
2.1.2 Caratteristiche dell'involucro edilizio	pag. 17
2.1.3 Orientamento, disposizione dei locali e caratteristiche dei manufatti	pag. 17
2.1.4 Rivestimento isolante "a cappotto" esterno	pag. 20
2.1.5 Installazione di aperture vetrate a triplo vetro camera basso-emissive	pag. 20
2.2 Calcolo fabbisogno termico edificio	pag. 24
2.2.1 Calcolo della trasmittanza dei componenti opachi e dei ponti termici	pag. 24
2.2.2 Calcolo dello scambio termico di ventilazione	pag. 29
2.2.3 Calcolo del fabbisogno termico dell'edificio secondo la UNI-TS 11300	pag. 30
2.2.4 Calcolo degli scambi termici	pag. 31
2.2.5 Calcolo degli apporti termici	pag. 33
2.2.6 Portata di ventilazione	pag. 36
2.2.7 Parametri dinamici	pag. 36
2.2.8 Esempio di calcolo per un vano della casa	pag. 37
2.2.9 Fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il riscaldamento	pag. 40

Capitolo 3 IMPIANTI AD ENERGIA RINNOVABILE: IMPIANTO SOLARE TERMICO

Introduzione rinnovabili

3.1 Introduzione solare termico	pag. 41
3.1.1 Potenza di irraggiamento	pag. 41
3.1.2 Classificazione impianti solari	pag. 42
3.1.3 Collettori solari	pag. 45
3.1.4 Collettori solari piani	pag. 45

3.1.5 L'isolamento termico	pag. 47
3.1.6 I pozzetti per i sensori	pag. 47
3.1.7 Parametri caratteristici:	pag. 47
3.1.8 L'efficienza istantanea di un collettore piano	pag. 48
3.1.9 I collettori sottovuoto Collettori a tubi evacuati	pag. 50
3.1.10 Collettori a tubi evacuati con circolazione diretta del fluido termovettore	pag. 50
3.1.11 Collettori sottovuoto a tubi di calore	pag. 50
3.1.12 Alcuni valori numerici di valori di riferimento	pag. 51
3.1.13 Intervento di risparmio energetico	pag. 51
3.1.14 Influenza dell'orientamento	pag. 52
3.2 Dimensionamento di un impianto solare per la produzione di ACS	pag. 52
3.2.1 Fattore di copertura solare	pag. 53
3.2.2 Efficienza del sistema	pag. 53
3.2.3 Analisi del fabbisogno di acqua calda sanitaria	pag. 53
3.2.4 Dimensionamento di massima della superficie captante	pag. 53
3.2.5 Estensione della superficie captante	pag. 54
3.2.6 Calcolo del fabbisogno di acqua calda sanitaria	pag. 54
3.2.7 Analisi del fabbisogno di acqua calda	pag. 54
3.2.8 Dimensionamento della superficie dei collettori	pag. 54
3.2.9 Dimensionamento del serbatoio	pag. 55
3.2.10 Scambiatori di calore del circuito solare	pag. 56
3.2.11 Calcolo della perdita di pressione e scelta della pompa	pag. 54
3.2.12 Pressione d'esercizio, vaso d'espansione e valvola di sicurezza	pag. 57
3.2.13 Normativa di riferimento per il solare termico	pag. 58
3.3 Dimensionamento impianto solare termico	pag. 59
3.3.1 Determinazione del fabbisogno di ACS	pag. 59
3.3.2 Dimensionamento di massima del solare	pag. 64
3.3.3 Calcolo economico ed ambientale	pag. 65
3.3.4 Esempio di serbatoio di accumulo con allacciamento alla caldaia	pag. 67

Capitolo 4 IMPIANTO A ENERGIA RINNOVABILE: IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Introduzione fotovoltaico

4.1 Sistema fotovoltaico connesso alla rete (grid-connected)	pag. 68
4.1.1 Inverter funzionamento	pag. 69
4.1.2 Ponte di conversione	pag. 70
4.1.3 Trasformatore	pag. 71
4.1.4 Allacciamento alla rete di distribuzione	pag. 72
4.1.5 Misura dell'energia prodotta ed incentivata	pag. 73
4.1.6 Parametri e curve caratteristiche e proprietà degli inverter	pag. 73
4.1.7 Misura dell'energia prodotta ed incentivata	pag. 74
4.1.8 Parametri e curve caratteristiche e proprietà degli inverter	pag. 74

4.1.9 Sistemi con inverter centralizzato	pag. 75
4.1.10 Dimensionamento dell'inverter: la potenza nominale	pag. 76
4.1.11 Massimo numero di moduli connessi in serie in una stringa	pag. 76
4.1.12 Numero minimo di moduli da collegare in una stringa	pag. 76
4.1.13 Determinazione del numero di stringhe	pag. 76
4.2 Impianto della casa	pag. 79
4.2.1 Calcolo del dimensionamento dell'impianto di casa mia	pag. 79
4.2.2 Verifica montaggio	pag. 83
4.2.3 Montaggio in disposizione orizzontale	pag. 83
4.2.4 Dati tecnici moduli ed inverter	pag. 84
4.2.5 Individuazione delle caratteristiche tecniche e della tensione di modulo	pag. 85
4.2.6 Calcolo della tensione a -10 °C e a + 70 °C	pag. 86
4.2.7 Verifica configurazione generatore FV – Inverter	pag. 86
4.2.8 Conto energia e recupero investimento Lo Scambio sul Posto 2009	pag. 88
4.2.9 Valorizzazione dell'energia prodotta dall'impianto	pag. 89
4.3 Recupero investimento	pag. 91
4.3.1 Emissioni evitate	pag. 92
4.3.2 Calcolo del rendimento globale medio stagionale	pag. 93

Capitolo 5 CONFRONTO CON UN CASO STUDIO DI UN INVOLUCRO TRADIZIONALE

5.1 Caratteristiche dei manufatti ed infissi casa tradizionale	pag. 94
5.1.1 Fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento casa tradizionale	pag. 94
5.1.2 Confronto costi tradizionale e casa passiva	pag. 95

Conclusioni	pag. 99
--------------------	---------

Bibliografia	pag. 100
---------------------	----------

Capitolo 1. PASSIVHAUS

Introduzione

Nel 1992, l'ENEA pubblicò il volume intitolato "Edifici bioclimatici in Italia" in cui furono pubblicati 151 esempi di edifici solari passivi, ovvero, edifici che sfruttano l'energia solare in maniera passiva.

Nel frattempo il termine "edificio passivo" è diventato, almeno nell'Europa centrale, un preciso standard energetico che indica un edificio caratterizzato da un fabbisogno termico inferiore ai quindici chilowattora al metro quadro e anno (15 kWh/m²anno).

Tale valore è un settimo dell'energia mediamente consumata negli edifici residenziali italiani. Questo basso fabbisogno termico consente di riscaldare una casa esclusivamente con energie rinnovabili, senza l'ausilio di un impianto convenzionale di riscaldamento e senza diminuire il comfort abitativo. Per questo motivo gli edifici passivi non godono solo l'interesse della politica energetica ed ambientale, ma anche quella degli abitanti che devono pagare bollette meno pesanti. Una signora tedesca che, da qualche anno, abita in un edificio passivo, afferma: "Per il riscaldamento del mio alloggio di 120 metri quadrati pago adesso 50 € l'anno, una cifra irrisoria, mentre nella mia casa precedente dovevo pagarne 900".

Il concetto dell'edificio passivo è stato ideato, già nel 1988, da Wolfgang Feist, fondatore e direttore del Passivhaus-Institut Darmstadt (Germania), e da Bo Adamson dell'Università Lund (Svezia) che grazie ad un contributo finanziario del Ministero per l'Economia della Regione tedesca dell'Assia, hanno potuto eseguire gli studi preliminari. Il primo edificio passivo è stato realizzato solo pochi anni dopo, nel 1991, a Darmstadt-Kranichstein.

Tra il 1998 e il 2001 si è svolto il progetto europeo CEPHEUS (Cost Efficient Passive Houses as European Standards), nell'ambito del quale sono stati costruiti edifici passivi complessivamente 221 unità abitative in 14 diverse località dell'Europa centrale e settentrionale, prevalentemente in Germania, Austria Svizzera e Svezia. Nel progetto CEPHEUS era inclusa anche un ampio programma di monitoraggio e controllo per accertare i consumi energetici primari e finali per il riscaldamento e la produzione di acqua calda, nonché i consumi elettrici. Sono stati rilevati anche le condizioni climatiche e il comfort abitativo. Con la realizzazione del progetto CEPHEUS si è potuti dimostrare scientificamente che ridurre i consumi energetici negli edifici, nella misura di oltre il settanta per cento.

Per quante riguarda la questione della costruzioni di edifici passivi in climi mediterranei, i calcoli da eseguire dimostreranno come è più facilmente ottenibile lo standard di un edificio passivo, con meno oneri e quindi a costi di costruzione minori rispetto a quelli dell'Europa centrale.

Inoltre lo standard prescrive che il costo di costruzione non deve superare più del 30% del costo di costruzione di un edificio convenzionale.

Come già detto, l'edificio passivo rappresenta un particolare standard energetico che stabilisce un consumo massimo di energia di 15 kWh/(m² anno) per il riscaldamento e- inclusi illuminazione ed altri usi domestici – uno di 42 kWh/(m² anno). Questo standard si ottiene principalmente con le seguenti misure:

- un forte isolamento termico dell'involucro che riduce le perdite di calore;
- uno sfruttamento passivo dell'energia solare e delle fonti interne per il calore;
- una ventilazione meccanica controllata che recupera del calore dall'aria in uscita;
- la produzione di acqua calda con un collettore solare o una pompa di calore;
- uso di apparecchiature elettriche ad alta efficienza energetica.

La misura più importante è senz'altro l'isolamento termico che, in inverno, deve ridurre le perdite di calore fino ad un livello che consenta di rinunciare ad un impianto di riscaldamento convenzionale e di coprire il fabbisogno termico residuo con il sole ed altre fonti energetiche gratuite.

L'energia solare captata dalle finestre può coprire già una buona parte del fabbisogno termico di un edificio passivo, ma il sole non è l'unica fonte sfruttabile per il riscaldamento. Le persone, i corpi illuminanti e gli apparecchi elettrici accesi emettono del calore e anche l'aria in uscita contiene del calore che può essere recuperato.

Si può risparmiare energia non solo in inverno, ma anche in estate, soprattutto nei paesi mediterranei caratterizzati da elevate temperature estive. In questa stagione, gli edifici senza un sufficiente isolamento si riscaldano facilmente sotto il sole e l'aria calda entra attraverso le finestre aperte. In condizioni di surriscaldamento si accende il climatizzatore e, da quando questi apparecchi sono disponibili a prezzi modici, i consumi estivi di energia elettrica aumentano di anno in anno.

1.1. Perché costruire case passive

Di risparmio energetico si è cominciato a parlare nel secolo scorso dopo la prima crisi del petrolio degli anni settanta. A quell'epoca la maggiore preoccupazione riguardava il precoce esaurimento di questa risorsa fossile, nonché l'elevata dipendenza dei paesi industrializzati dagli stati dell'OPEC. Oggi il problema si pone in maniera più diversa. Dai pozzi il petrolio fluisce ancora in abbondanza e vengono sempre nuovi giacimenti. Ciò che oggi preoccupa maggiormente sono le emissioni di biossido di carbonio (CO₂) che derivano dalla combustione di petrolio, carbone, gas naturale dai quali si produce l'ottanta per cento dell'energia finale, e tale emissione in atmosfera è la causa principale dell'effetto serra che, a sua volta, provoca il cambiamento climatico.

Ridurre queste emissioni e conseguentemente i consumi energetici vuol dire perciò meno emissioni gas serra e più sostenibilità ambientale.

Le strategie per ridurre le emissioni sono due: il risparmio energetico e la promozione di tecnologie che usino fonti energetiche rinnovabili come il sole, l'acqua e le biomasse. Uno dei settori in cui si può risparmiare più energia è sicuramente quello edilizio. Allo stato attuale i nostri edifici sono dei veri e propri divoratori di energia che consumano più del 40% di energia per il riscaldamento, raffrescamento e illuminazione e produzione di acqua calda.

In Italia, quindi due terzi di energia finale è consumata per il riscaldamento invernale ed il raffrescamento estivo, un quinto per cucinare e produzione di acqua calda ed il resto per l'illuminazione ed altri usi domestici.

1.1.1 Definizione dello standard casa passiva

Lo standard edilizio denominato “Casa Passiva” offre un criterio vantaggioso per minimizzare la richiesta energetica degli edifici, siano essi oggetto di una costruzione ex-novo sia di una ristrutturazione, in accordo con il principio globale della sostenibilità e migliorando il comfort percepito dagli occupanti degli edifici stessi. Si genera così la base su cui è possibile rispondere all'esigenza di soddisfare il fabbisogno energetico di queste nuove costruzioni completamente con fonti rinnovabili, compatibilmente con i limiti derivanti dalla scarsa disponibilità di tali risorse e dai costi aggiuntivi che queste comportano. Ciò che rende lo standard PassivHaus così redditizio è che, seguendo il principio di semplicità, conta sull'ottimizzazione di quei componenti di una costruzione che sono necessari in ogni caso: l'involucro edilizio, i componenti finestrati ed il sistema automatico di ventilazione. Quest'ultimo può non sembrare necessario ma è sicuramente conveniente per motivi igienici. Migliorare l'efficienza di questi componenti fino al punto in cui un sistema separato di distribuzione di calore non è più necessario porta ad ottenere significativi risparmi con i quali è possibile finanziare i costi supplementari oggetto del miglioramento. Lo standard Casa Passiva è definito in modo che gli extra-costi di costruzione siano ripagati in un periodo di tempo ragionevole attraverso una riduzione delle bollette, quella del riscaldamento su tutte. Le soluzioni adottate vengono facilmente integrate nei progetti degli edifici, che non differiscono significativamente dagli edifici attuali in termini di estetica, distribuzione del calore e tecniche di costruzione. Esse sono pertanto ben accette dalle famiglie e attrattive per i promotori immobiliari. Lo standard Casa Passiva sostanzialmente è un perfezionamento dello standard già conosciuto “Low Energy House”. Le Case Passive sono costruzioni che assicurano un elevato comfort climatico interno sia d'estate che d'inverno senza avere bisogno di un sistema convenzionale di distribuzione di calore. La casa passiva è un edificio in cui i requisiti relativi al comfort termoisometrico interno sono raggiunti e controllati senza l'ausilio di sistemi di climatizzazione convenzionali (Carletti & Sciarpi, 2003). I requisiti energetici di un edificio passivo, stabiliti dal Passivhaus Institut di Darmstadt, consistono in un fabbisogno energetico per riscaldamento non superiore a 15 kWh/m² all'anno; il fabbisogno energetico complessivo (riscaldamento domestico, produzione di acqua calda per usi sanitari, illuminazione ed altri usi domestici) non deve invece superare i 42 kWh/(m² anno). Gli edifici passivi sono caratterizzati da un involucro edilizio fortemente isolato caratterizzato da elevate prestazioni fisico-tecniche dei singoli componenti, dalla sensibile limitazione dei ponti termici nei collegamenti tra elementi costruttivi diversi e da una elevata tenuta all'aria ($n_{50} \leq 0,6h^{-1}$). L'analisi degli edifici passivi europei e di quelli italiani ha mostrato notevoli differenze per quanto attiene i sistemi costruttivi, a fronte di un sistema impiantistico che, nella sua concezione generale, mantiene pressoché costanti tutti i principali componenti. Lo standard è stato chiamato "Casa passiva" per via del fatto che l'uso “passivo” dei guadagni gratuiti di calore, costituiti dall'irradiazione solare attraverso le finestre ed internamente dalle emissioni di calore degli apparecchi e degli occupanti, è sufficiente a mantenere la costruzione a temperature confortevoli durante il periodo di riscaldamento. Per riuscire a minimizzare le altre fonti di consumo di energia della costruzione, in special modo

l'elettricità per gli elettrodomestici, la filosofia alla base dello standard Casa Passiva favorisce l'impiego delle tecnologie più efficienti. Usare solamente misure passive potrebbe essere possibile in alcuni climi, ma non è sicuramente ragionevole nella maggior parte di essi.

Possiamo fare alcune semplici considerazioni pratiche:

1) Tutte gli edifici che intendano essere energeticamente efficienti devono essere chiusi ermeticamente; in case chiuse ermeticamente si necessita sempre di un sistema di ventilazione. Ciò significa che nel concetto di Casa Passiva il componente tecnico "sistema di ventilazione", del quale si necessita comunque, sarà sufficiente per riscaldare (e raffreddare) la costruzione senza bisogno di condotti supplementari, diametri delle condutture più ampi, ventilatori supplementari etc...

2) L'applicazione dello standard Casa Passiva rende possibile costruire gli edifici con un recupero molto efficiente di calore e farlo in modo redditizio. Ciò è difficile con altre tipologie edilizie, perché i sistemi di recupero di calore diventano un investimento supplementare al sistema di riscaldamento abbastanza costoso e diventa quindi difficile avere un ritorno ragionevole. Per questo motivo è necessario ridurre i costi di almeno uno dei due sistemi: o del sistema di ventilazione o del sistema di riscaldamento. Se si riducono solo i costi per il sistema di ventilazione, scegliendo per esempio una ventilazione operata solo tramite un ventilatore di scarico, allora le perdite di calore per ventilazione saranno abbastanza elevate e la costruzione avrà bisogno di un sistema di riscaldamento convenzionale; in questo caso il miglior risultato ottenibile potrebbe essere una casa a bassa energia.

Alternativamente si può intervenire su tutti i componenti dell'edificio per facilitare il sistema di distribuzione del calore fino al punto in cui possa essere integrato nel sistema di ventilazione; in questo caso la costruzione sarà una casa passiva. I consumi straordinariamente bassi delle case passive sono una conseguenza diretta del concetto sopra esposto, infatti soddisfare la ridotta richiesta termica per il riscaldamento riscaldando l'aria di rifornimento nel sistema di ventilazione può funzionare soltanto se le perdite di calore generali sono molto basse. Le Case Passive hanno bisogno così di circa l'80% in meno di riscaldamento rispetto alle nuove costruzioni tradizionali, dato questo rilevato con riferimento alle varie regolamentazioni edilizie nazionali a livello europeo vigenti nel 1999, anno in cui sono stati progettati e realizzati i primi progetti CEPHEUS.

Nel diagramma riportato di seguito vengono indicati i diversi standard costruttivi con l'indicazione del relativo fabbisogno annuale di energia per riscaldamento.

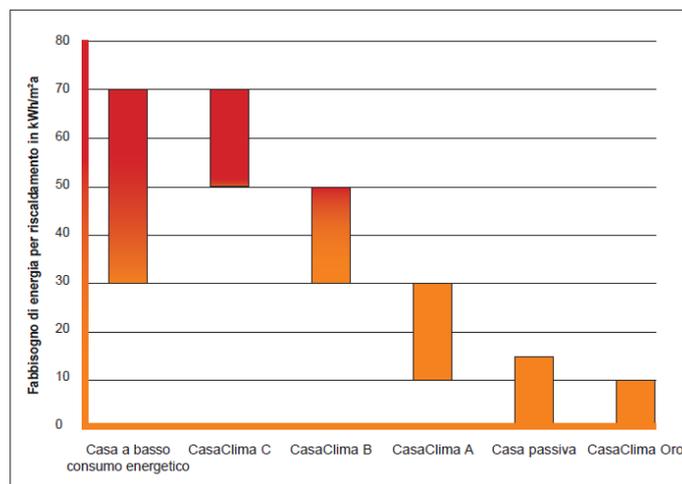


Figura 1: standard costruttivo e relativo fabbisogno annuale di energia per riscaldamento

1.1.2 Cosa rende un edificio casa passiva

I fattori da considerare nella progettazione di un edificio passivo sono i seguenti:

- condizioni climatiche locali;
- orientamento dell'edificio;
- elementi ombreggianti nell'ambiente esterno;
- rapporto tra superficie involucro e volumetria;
- disposizione dei locali.

Un grossolano indicatore delle condizioni climatiche locali sono i gradi-giorno (GG). Un alto numero di essi indica un clima invernale molto freddo e un'elevata rilevanza del riscaldamento. Altri dati climatici rilevanti per la progettazione degli edifici sono le temperature medie mensili dell'aria esterna, l'irradiazione solare giornaliera, l'irradiazione globale su superfici verticali differenziate secondo l'esposizione, la velocità del vento, ecc.

Il principale problema degli apporti solari è che questi non arrivano in forma concentrata e non sono costanti nel tempo. Essi variano con le stagioni e con la nuvolosità, secondo l'angolo di incidenza e la riflettanza delle superfici. A cielo coperto, sulla superficie della Terra arriva solo la radiazione diffusa e questa è molto inferiore rispetto a quella diretta. Nella progettazione di un edificio si deve tenere conto anche del micro-clima, entro certi limiti esso può essere modificato, per esempio, piantando sul lato Nord (anche NE e NO) dell'edificio, alberi e siepi sempre verdi che formino una barriera contro i venti freddi, mentre sul lato sud, in cui risulta sempre la massima irradiazione disponibile, si possono creare degli specchi d'acqua che riflettono la luce e che, in estate, quando l'acqua evapora, hanno un effetto raffrescante. Negli edifici normali si risente sovente anche dell'influenza del vento. I venti freddi, normalmente provenienti da N o NO, raffreddano notevolmente l'involucro dell'edificio, penetrano attraverso i giunti e le fessure delle finestre e aumentano il fabbisogno termico. Grazie al loro involucro fortemente coibentato ($U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) ed impermeabile ($n_{50} < 0,6/\text{h}$) gli edifici passivi sono poco sensibili al vento che incide sul loro fabbisogno termico di meno di un uno per cento.

1.1.3 L'orientamento

Il sole sorge in inverno a Sud-est e tramonta a Sud-ovest, una facciata esposta a Sud è quindi l'unica a ricevere radiazioni per tutto il giorno. In quella stagione la posizione del sole è anche bassa e la radiazione incide sulla facciata sud perpendicolarmente, così le finestre fanno penetrare i raggi solari nello spazio utile proiettato delle stanze. Ciò significa che il lato Sud dell'edificio riceve il massimo di radiazioni proprio in inverno quanto è più richiesto, mentre in estate, quando la posizione del sole è alta e i suoi raggi si incontrano a mezzogiorno in un angolo acuto, ne riceve meno. In primavera ed in autunno gli apporti solari distribuiti in misura quasi uguale su tutte le superfici verticali, ad eccezione di quelle orientate verso ovest che ricevono sole solo per pochi giorni d'estate.

1.1.4 Ombreggiamento

Assenza di elementi ombreggianti che possono influire col resto della struttura e che potrebbero modificare il comportamento e la prestazione termica dell'involucro durante tutto l'anno.

1.1.5 Rapporto tra superficie e volumetria

Un fattore non meno importante per il fabbisogno energetico è la forma dell'edificio. In un edificio si riscalda un volume, lo scambio termico tra l'interno e l'esterno avviene invece attraverso la superficie involucro. Tanto è più elevata la superficie che racchiude il volume, tanto più elevato è lo scambio. Ciò significa che un edificio ad alta efficienza energetica dovrebbero avere una forma compatta e che si deve rinunciare a inutili sporgenze o rientranze che aumentano la superficie. La compattezza si esprime tramite il rapporto tra superficie e volumetria (S/V) che, nel caso di un edificio passivo, dovrebbe essere inferiore a 0,6.

1.1.6 La disposizione dei locali

Negli edifici solari a basso consumo energetico si è dimostrata molto utile la suddivisione degli alloggi in differenti zone termiche disponendo i locali più riscaldati (soggiorno, stanze da letto) sul lato Sud; quelli meno riscaldati sul lato nord (bagni, locali di servizio), dove assumono la funzione di "cuscinetti termici". Il concetto è stato applicato anche in molti edifici passivi. La funzione di "cuscinetto" è poco rilevante in questo caso, perché il forte isolamento termico impedisce il raffreddamento della parete e dei locali del lato Nord. Si è fatta inoltre esperienza che il sistema di ventilazione meccanica distribuisce l'aria, e con questa il calore, pressoché uniformemente in tutta l'abitazione e quindi non si creano grandi differenze di temperatura. In ogni caso, in un edificio passivo la differenza di temperatura tra le singole zone non supera mai 5 K e ad una differenza inferiore a 5 K la suddivisione in differenti zone termiche ha più molto senso. Quando invece in due zone di un medesimo alloggio la differenza di temperatura supera gli 8 K, l'aria calda si sposta più rapidamente dalla zona più calda a quella più fredda e crea delle correnti d'aria. Particolare attenzione

merita invece l'inserimento delle scale nei palazzi residenziali. Queste devono trovarsi o interamente all'interno dell'involucro tecnico, oppure interamente all'esterno di questo.

1.1.7 L'involucro: gli elementi costruttivi e una finestra per edifici passivi in Italia

I più importanti elementi costruttivi che determinano l'efficienza energetica di un edificio passivo sono l'involucro termico e le finestre.

L'involucro

L'involucro termico ha la funzione di ridurre gli scambi termici tra interno ed esterno; in inverno deve diminuire le perdite di calore e in estate prevenire il surriscaldamento delle strutture. Nel caso di un edificio passivo l'involucro deve ridurre gli scambi termici in misura tale che il fabbisogno energetico per riscaldamento non superi i 15 kWh/(m² anno). Ciò significa che l'involucro deve avere un isolamento termico molto efficace ed impedire l'infiltrazione d'aria. Uno dei compiti della progettazione è la determinazione degli scambi termici tra l'interno e l'esterno dell'edificio. La determinazione richiede un particolare calcolo, detto "bilancio termico" e, per eseguirlo occorre una precisa definizione dell'area dell'involucro. Nel caso di un edificio passivo, l'area rilevante per il bilancio termico è quella esterna dell'isolamento termico che deve essere sempre applicato "a cappotto", ossia all'esterno delle pareti perimetrali, del solaio e del tetto. L'involucro termico deve essere sempre ininterrotto e quindi, nella sezione dell'edificio, deve essere possibile tracciarne il limite con un'unica linea.

Una finestra per edifici passivi in Italia

Per quanto riguarda la costruzione di edifici passivi in climi più miti come quelli dell'Europa centrale, ci si può chiedere se il tipo di finestra ($U < 0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, $g = 0,6$) sia veramente il più adatto. Una risposta la possiamo ricavare dal bilancio termico. Trascurando i ponti termici lineari, si può affermare che in Italia una simile finestra procura apporti solari tre volte maggiori che in Germania. Infatti in Germania, gli apporti netti ottenibili da un metro quadrato di finestra sono 33 kWh/(m² anno), mentre in Italia sono 92 kWh/(m² anno), perché la radiazione solare è più consistente e i gradi giorno sono di meno. Volendo ottenere apporti netti nella misura del 13-40 per cento di quelli lordi, in una casa passiva italiana sarebbero già sufficienti finestre con un valore $U = 1,4$ o $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ che sono anche meno costose quelle usate nell'Europa centrale. Gli apporti netti ottenibili non sono però l'unico criterio per la scelta delle finestre. Per il comfort termico all'interno è anche rilevante che la temperatura della superficie interna del vetro (t_i) non sia inferiore di 3,5 K di quella dell'aria interna (T_i). Anche questa differenza di temperatura può essere calcolata. In condizioni di una temperatura interna di 18 °C e una esterna di -2 °C, la temperatura sulla superficie interna di una finestra con $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ è di 14,5 °C e quindi la differenza è proprio di 3,5 K.

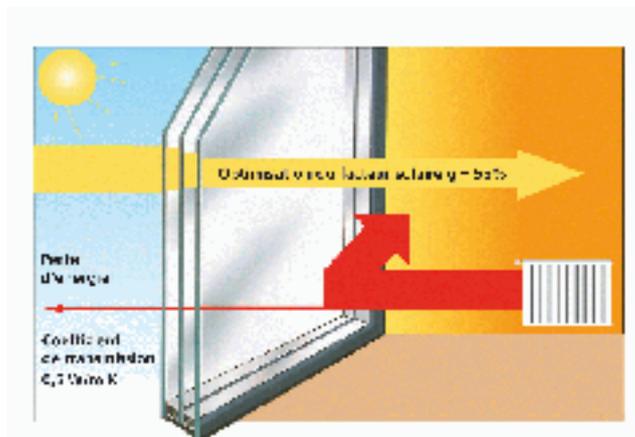


Figura 2: esempio di triplo vetro camera basso emissivo

1.1.8 L'isolamento termico

Il calore migra sempre dalla parte più calda verso quella più fredda. In inverno, quando l'edificio è riscaldato, la temperatura interna supera quella esterna e il calore migra attraverso le pareti dall'interno verso l'esterno, mentre in estate, quando il sole riscalda le pareti, va nella direzione opposta. Più grande è la differenza di temperatura, tanta maggiore è l'intensità del flusso. L'isolamento termico ha la funzione di rallentare questi flussi e di ridurre gli scambi tra interno ed esterno nell'unità di tempo e perciò è vantaggioso sia in inverno, sia in estate. Nel caso di un edificio passivo, l'isolamento termico dell'involucro è essenziale, perchè deve ridurre il fabbisogno energetico a quel tanto che può essere coperto dall'energia solare, da fonti interne e da rinnovabili. Per ridurre il fabbisogno energetico fino a quel livello, nell'Europa centrale, le parti opache dell'involucro devono possedere un valore $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ e ciò significa in quella regione apporre sempre termoisolanti massicci: 25 cm sui muri, e 40 cm sul tetto. Nelle regioni con un clima piuttosto mite, come quelli mediterranei, il valore U si raggiunge già con strati isolanti molto più sottili. L'isolamento termico si ottiene mediante l'impiego di materiali che possiedono una bassa conducibilità termica ($< 0,04$). Tutti i materiali che possiedono questa caratteristica sono ammissibili, ma devono essere scelti in riguardo al sistema costruttivo (costruzioni in muratura, in legno) e alle condizioni dei luoghi in cui saranno applicati (asciutti, umidi, ecc). I materiali termoisolanti sono normalmente morbidi e poco resistenti all'urto e alle intemperie; alcuni sono anche igroscopici ed assorbono umidità. Devono perciò essere protetti, per esempio, da un intonaco e da un rivestimento. Nell'Europa Centrale si vedono spesso esterni di legno, ma nel Centro e nel Sud d'Italia sono poco usati, non solo perchè estranei alla tradizione edilizia locale, ma anche perchè in estate, il legname si deforma facilmente. Intonaci e rivestimenti in muratura sono quindi i più indicati. Molti edifici passivi oggi sono costruiti anche a secco (tecnica S/R a secco) con elementi prefabbricati. Il benessere fisico di una persona all'interno di un ambiente dipende in misura considerevole dal comfort termico. I due fattori principali del comfort termico sono la temperatura dell'aria e la temperatura di irradiazione. La temperatura dell'aria desiderata all'interno di un edificio viene garantita dal riscaldamento, mentre la temperatura media di irradiazione all'interno di un ambiente dipende dalle temperature delle superfici degli elementi strutturali che circondano la persona. L'isolamento termico influisce

direttamente sulle temperature delle superfici. In effetti, quanto migliore risulta l'isolamento termico di un edificio, tanto migliori saranno anche le temperature delle superfici delle pareti e quindi il clima all'interno dell'ambiente. La cessione di calore del corpo umano alle superfici dell'ambiente da cui è circondato viene operata mediante irradiazione di calore che sarà tanto maggiore quanto più bassa sarà la temperatura delle superfici. Una parete esterna fredda oppure il vetro freddo di una finestra può pertanto suscitare una sensazione di freddo anche nel caso in cui la temperatura dell'aria risultasse gradevole. In generale è possibile affermare che la temperatura dell'aria dell'ambiente può essere abbassata aumentando la temperatura delle superfici circostanti, senza compromettere minimamente il comfort. Per il periodo di riscaldamento vale la seguente regola d'oro: In genere si prova un calore piacevole quando la temperatura delle pareti circostanti sommata alla temperatura dell'aria dà all'incirca la nostra temperatura corporea. Ad esempio una temperatura dell'aria di 20 °C in un edificio poco isolato con temperature delle superfici medie comprese fra 14 e 16 °C non è sufficiente per garantire il comfort. Per sopperire a questa lacuna la temperatura dell'aria dell'ambiente dovrebbe essere aumentata a 22 o anche 24 °C, senza però riuscire ancora a rendere il comfort ottimale. Viceversa in un edificio ben isolato con una temperatura delle superfici media intorno ai 19 °C il comfort ottimale viene raggiunto già ad una temperatura ambiente di 20 °C. Un buon isolamento dell'edificio consente quindi di risparmiare energia per il riscaldamento non solo mediante una riduzione della dispersione di calore attraverso le pareti esterne, ma anche con temperature ambiente più ridotte. Se si considera che il calo della temperatura ambiente di un grado consente un risparmio del 6% sulle spese di riscaldamento, l'isolamento termico acquista un'importanza non indifferente.

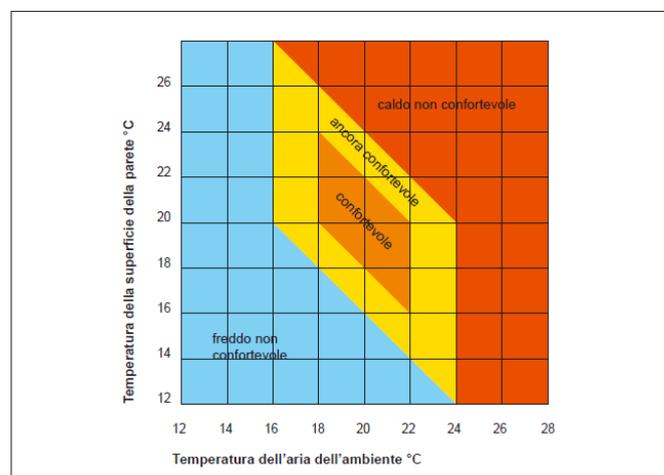


Figura 3: *diagramma di comfort*

1.1.9 La questione degli extra spessori

I regolamenti urbanistici fissano il volume ammissibile degli edifici in rapporto con l'area del terreno. Il volume viene determinato sulla base delle dimensioni esterne. Grandi spessori delle pareti riducono quindi la superficie utile dei piani e per questa motivo i costruttori preferiscono delle pareti fini che però spesso sono termicamente insufficienti. Il problema è stato recentemente affrontato da varie Regioni e Province italiane che, per promuovere la

costruzione di isolamenti termici più efficaci, hanno emanato delle normative che regolano il calcolo della volumetria di casa di pareti perimetrali con spessori > 30 cm. Con la stessa logica, nell'altezza degli edifici non è computata la porzione dei solai interpiano eccedenti i 40 cm di spessore, fino ad un extra-spessore massimo di 15 cm. Queste disposizioni normative non sono state ancora emanate per edifici passivi, ma ne agevolano la costruzione perchè il massiccio isolamento termico non 'mangia' più superficie utile.

1.1.10 L'assenza di ponti termici

Sono detti ponti termici quelle parti dell'involucro di un edificio che, rispetto alla media, hanno trasmittanza termica più elevata. Nella fattispecie si tratta di elementi termicamente insufficientemente isolati, attraverso i quali il calore si diffonde più rapidamente. Gli elementi che solitamente costituiscono dei ponti termici sono i balconi, le gronde e altri elementi sporgenti della struttura, ma anche i collegamenti tra pareti ed infissi. I ponti termici sono la causa principale della condensazione del vapore acqueo sulle pareti e della conseguente formazione di muffe. Peggio ancora quando la condensazione avviene all'interno delle strutture ed inumidisce il materiale termoisolante che, in questo caso, perde i suoi pregi. Costruire edifici senza ponti termici non sola fa risparmiare energia, ma rende anche più salubri le abitazioni proteggendo la struttura edilizia dal degrado. Tuttavia i ponti termici non sono totalmente evitabili. Punti difficili rimangono sempre i collegamenti tra pareti e fondazione e tra pareti e finestre, ma il loro effetto si può attenuare scegliendo un'opportuna costruzione. Molto efficaci ed economiche sono le seguenti soluzioni:

- montare le finestre all'estradosso della parete in modo che l'isolamento termico copra almeno una fascia di 5 cm del telaio.
- iniziare la muratura perimetrale sopra lo scantinato usando, per il primo filare, blocchi di cemento alleggerito (*gasbeton*) o elementi speciali che possiedano una bassa trasmittanza termica.
- costruire i balconi senza contatto con il solaio o all'esterno dell'involucro termico, oppure su mensole.

1.1.11 L'impermeabilità al vento

In un edificio, pur essendo dotato di un elevato isolamento termico, molto calore va disperso quando l'aria penetra attraverso giunti e le fessure. I punti più deboli in cui avviene la maggior parte delle infiltrazioni sono i giunti tra finestra e parete. Ancora peggio è la situazione quando la pressione la pressione avviene dall'interno. In questo caso l'aria calda e umida dell'interno si raffredda nei giunti, il vapore acqueo condensa e inumidisce le strutture. I flussi d'aria attraverso l'involucro in qualsiasi direzione si possono contrastare con delle barriere al vapore che però devono essere applicate con molta accuratezza. Un semplice guasto ad una barriera al vapore può causare perdite di calore di 800-1000 kWh/anno. Costruire un edificio sufficientemente impermeabile alla pressione del vento non è molto difficile. Buoni risultati si ottengono già con una parete in muratura ben intonacata. L'impermeabilità dell'involucro di un edificio passivo è accertata mediante uno speciale test,

il cosiddetto Blower-Door-Test, descritto dalla norma ISO/DIS 9972. Con il test si misura il ricambio d'aria per infiltrazione in condizione di una differenza di pressione di 50 Pa. Il numero di ricambi d'aria in questa condizione (n_{50}) è dato dalla seguente formula:

$$n_{50} = \frac{V'}{V_L}$$

dove:

V' : è il volume d'aria infiltrante;

V_L : è il volume riscaldato (o climatizzato) dell'edificio.

Per gli edifici passivi si raccomanda un valore n_{50} compreso tra lo 0,2 e lo 0,6/h, cioè la metà di quello richiesto dalla DIN 4108-2. Il test viene eseguito installando un ventilatore sulla porta d'ingresso o su una finestra, mentre tutte le aperture rimangono ermeticamente chiuse. Il ventilatore espelle l'aria all'esterno fino ad arrivare ad una differenza di pressione prescelta, poi si misura con un flussometro il volume dell'aria che affluisce attraverso l'involucro. L'afflusso d'aria viene normalmente misurato in differenti condizioni di pressione e dai risultati ottenuti si determina il ricambio d'aria in condizione di una differenza di pressione di 50 Pa.

Capitolo 2 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO E DEL LAVORO DI SIMULAZIONE

2.1 Studio casa passiva in Sicilia

Il modello di casa passiva proposto in Sicilia nel luogo preso in esame è da considerare come un primo approccio allo studio di un modello base per quantificare il linea di massima il comportamento di un edificio in regioni a clima prettamente mediterranei. Come sappiamo il concetto di casa passiva è nato in Germania. Visto il gran successo che hanno riscontrato tali edifici negli anni precedenti, ci si è chiesto perché non proporre tale concezione del costruire anche in zone del sud dell'Europa che notoriamente hanno caratteristiche climatiche più favorevoli rispetto a quelle dell'Europa centrale.

2.1.1 Identificazione del luogo di progettazione dell'involucro

La zona dove si è ipotizzata la progettazione dell'involucro è la Provincia di Enna, città ubicata al centro della Sicilia. Le caratteristiche climatiche di questa zona della Sicilia sono particolari rispetto al resto dei territori siciliani, in gran parte costieri e quindi molto influenzati dalla vicinanza con il mare. Infatti basta riportare la zona climatica di Enna in funzione dei gradi-giorno per rendersi conto della particolarità climatica di questa zona dell'entroterra siciliano:

TABELLA RIASSUNTIVA:

Zona climatica: Classificazione del territorio nazionale in zone climatiche, indipendenti dalla ubicazione geografica, ai fini del contenimento dei consumi di energia necessaria al funzionamento degli impianti termici di riscaldamento.

Fabbisogno di energia primaria: Valori limite per il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale per m^2 di superficie utile dell'edificio, espresso in $kWh/(m^2 \text{ anno})$.

Gradi - giorno: è la somma estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e la temperatura media esterna giornaliera.

Periodo: periodo annuale convenzionale di riscaldamento.

Ore: ore giornaliere in cui è consentita l'accensione degli impianti di riscaldamento.

Trasmittanza termica delle strutture verticali (muri): Valori limite della trasmittanza termica (U) delle strutture verticali opache, espressa in $W/(m^2 \text{ K})$.

Trasmittanza termica delle strutture orizzontali (solai) Valori limite della trasmittanza termica (U) delle strutture orizzontali, espressa in $W/(m^2 \text{ K})$. Come possiamo vedere, Enna compare insieme ad altre città del nord Italia, a loro volta caratterizzate da climi rigidi di inverno. Inoltre, rispetto a questa classificazione, Enna presenta un clima estivo non molto diverso dai comuni del resto della Sicilia, ma comunque ben diverso dal clima delle città che compaiono nella zona climatica E. Si capisce come, il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo abbiano medesima rilevanza, nella località in questione.

Città (esempi di capoluoghi)	Zona climatica	Fabbisogno di energia primaria			Trasmittanza Termica delle strutture verticali (muri)		Trasmittanza Termica delle strutture orizzontali (solai)	
		Gradi giorno	Periodo	Ore	1° gennaio 2006 fino al 31 Dicembre 2008 U (W/m²K)	dal 1° gennaio 2009 U (W/m²K)	1° gennaio 2006 fino al 31 Dicembre 2008 U (W/m²K)	dal 1° gennaio 2009 U (W/m²K)
Lampedusa, Linosa, Porto Empedocle	A	fino a 600	1° Dicembre 15 Marzo	6	0,85	0,72	0,80	0,68
Agrigento, Catania, Crotona, Messina, Palermo, Reggio Calabria, Siracusa, Trapani	B	da 601 a 900	1° Dicembre 31 Marzo	8	0,64	0,54	0,60	0,51
Bari, Benevento, Brindisi, Cagliari, Caserta, Catanzaro, Cosenza, Imperia, Latina, Lecce, Napoli, Oristano, Ragusa, Salerno, Sassari, Taranto	C	da 901 a 1400	15 Novembre 31 Marzo	10	0,57	0,46	0,55	0,44
Ancona, Ascoli Piceno, Avellino, Caltanissetta, Chieti, Firenze, Foggia, Forlì, Genova, Grosseto, Isernia, La Spezia, Livorno, Lucca, Macerata, Massa, Carrara, Matera, Nuoro, Pesaro, Pescara, Pisa, Pistoia, Prato, Roma, Savona, Siena, Teramo, Terni, Verona, Vibo Valenzia, Viterbo	D	da 1401 a 2100	1° Novembre 15 Aprile	12	0,50	0,40	0,46	0,37
Alessandria, Aosta, Arezzo, Asti, Bergamo, Biella, Bologna, Bolzano, Brescia, Campobasso, Como, Cremona, Enna, Ferrara, Cesena, Frosinone, Gorizia, L'Aquila, Lecco, Lodi, Mantova, Milano, Modena, Novara, Padova, Parma, Pavia, Perugia, Piacenza, Pordenone, Potenza, Ravenna, Reggio Emilia, Rieti, Rimini, Rovigo, Sondrio, Torino, Trento, Treviso, Trieste, Udine, Varese, Venezia, Verbania, Vercelli, Vicenza	E	da 2101 a 3000	15 Ottobre 15 Aprile	14	0,46	0,37	0,43	0,34
Belluno, Cuneo	F	oltre 3000	Nessuna limitazione	24	0,44	0,35	0,41	0,33

Lo studio che si propone di seguito prende in esame tali considerazioni, soprattutto per definire delle linee guida importanti per supportare delle ipotesi progettuali iniziali di base.

Quello che si vuole ottenere da questo primo approccio è quello di limitare il più possibile il fabbisogno termico di riscaldamento invernale e allo stesso tempo valutare, in funzione delle ipotesi progettuali iniziali, un basso fabbisogno di raffrescamento estivo tale da scongiurare l'impiego ed installazione di impianti di climatizzazione estiva. Questo approccio è rivolto evidentemente ad abbassare notevolmente gli apporti di energia primaria da fonti tradizionali, quali metano, gasolio, fino ad escluderli completamente (se non per usi cottura), e ricorre quanto è più possibile a fonti ad energia rinnovabile per:

- produzione di calore per riscaldamento;
- produzione acqua calda sanitaria;
- elettricità;

Per le prime due voci si è scelto di installare un impianto combinato costituito da un impianto solare termico e da una caldaia a biomassa a pellets (o anche sansa). Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, si è scelto di installare un impianto fotovoltaico grid-connected in conto energia.

2.1.2 Caratteristiche dell'involucro edilizio

La prima considerazione che è stata fatta riguarda l'isolamento di tutto l'involucro; si è scelto un isolamento a cappotto esterno di tutte le facciate. Questo porta a fare due considerazioni: la prima è quella che così facendo si limita notevolmente la trasmittanza termica delle pareti perimetrali che permettere di raggiungere uno standard alto dell'intero edificio rispetto a una concezione tradizionale del costruire; infatti lo spessore di tutte le pareti si attesta sui 40 cm e non i soliti 30 cm: tale extra spessore è dovuto alla messa in opera di un strato isolante di 10 cm. L'altra considerazione è quella di limitare le dispersioni termiche dovute ai cosiddetti ponti termici, che si verificano lungo giunture tra le pareti e le aperture, lungo gli angoli, i tramezzi, i collegamenti tra pareti e solai, visto che si è scelto un'installazione integrale su tutta la superficie delle facciate della casa.

	superficie pareti perimetrali (m ²)	superficie pavimento (m ²)	volume lordo (m ³)	superficie totale tetto (m ²)
totale	147,8	160,33	452,86	133,44
Volume netto da climatizzare				390,64 m ³ V
superficie utile (o netta calpestabile) dell'ambiente climatizzato				152,3 m ² S
Rapporto di forma				0,35 S/V

tabella 1-2: caratteristiche geometriche dell'involucro edilizio

2.1.3 Orientamento, disposizione dei locali e caratteristiche dei manufatti

Visti i ragionamenti fatti in precedenza, si è scelto di orientare l'edificio come segue:

tipologia vano	esposizione pareti	superficie pareti perimetrali	superficie pavimento m ²	altezza	volume m ³
salone	est + ovest	25	35,2	3	96,80
cucina	est + nord	25	14,9	3	40,98
ingresso	nord + ovest	10	6,6	3	18,15
bagno	est + nord	10	4,12	3	11,33
studio	est + sud	16	12	3	33,00
vano scale	ovest + sud		7,8	3	21,45
piano terra		86	80,62		221,71
corridoio	est + ovest	25	23,4	2,7	67,86
camera da letto 1	est + nord	15	16,13	2,7	46,777
camera da letto 3	est	4	11,28	2,7	32,712
bagno	nord + ovest	13,8	9,6	2,7	27,84
vano scale	ovest + sud		7,8	2,7	22,62
camera da letto 2	est + sud	4	11,5	2,7	33,35
primo piano		61,8	79,71		231,59

tabella 3: dati di progetto dell'involucro edilizio (altezza del soffitto del primo piano è considerata media)

In definitiva, nella seguente tabella si riportano i valori totali delle superfici dell'immobile:

superficie pareti perimetrali	147,8	m ²
superficie pavimento	160,33	m ²
volume	452,86	m ³
superficie totale da riscaldare	145,93	m ²

tabella 4: dati riassuntivi dei dati di progetto

Di seguito si riportano i prospetti e le piante della casa:

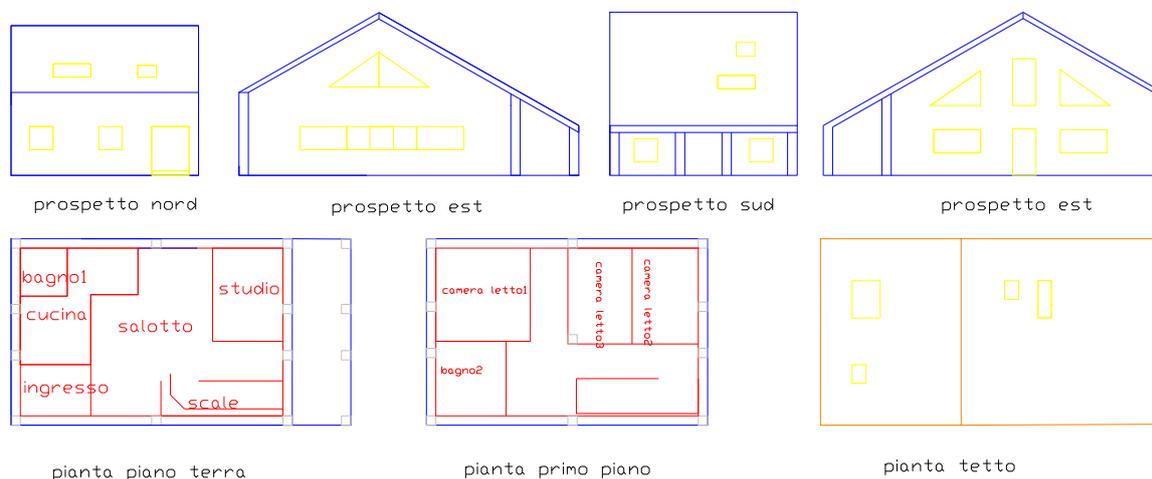


figura 4: prospetti, piante e tetto della casa

Le facciate “lunghe” orientate ad Est ed Ovest, a differenza di quelle corte orientate a Nord ed a Sud. Il perché di tale ipotesi di base per l’orientamento verrà valutata applicando le norme specifiche. Come si può vedere dalla figura si è fatta una distinzione importante sulla superficie di installazione dei componenti vetrati, ovvero degli infissi, sfavorendo la facciata nord in cui si installano infissi di modesta apertura per diminuire quelle lunghezze che comportano una dispersione termica del calore dall’interno verso l’esterno nei mesi invernali. In questa zona si è scelto di collocare quei locali che durante tutto l’anno hanno una quantità di apporti termici più alta rispetto al resto quali cucina e bagno al piano terra e primo piano, più una camera da letto sempre al primo piano.

	ovest	sud	est	nord	tot
sup vetrata	13,7	2	15,36	2	33,06
sup muratura	43,3	22	41,64	22	128,94
sup isolata	29,6	20	26,28	20	95,88
% sup vetrata	24,03	8,33	36,88	9,09	34,48

tabella 5: ampiezza delle superfici esterne diversamente orientate

Visto anche l’andamento dell’insolazione e del percorso solare annuale, la facciata sud è protetta da un portico a faccia aperta che permetterà una schermatura solare durante il periodo estivo, in modo da limitare il surriscaldamento; in inverno l’isolamento a cappotto esterno dovrebbe far ovviare alla prerogativa di collocare ampie superfici vetrate a sud per sfruttare il soleggiamento invernale, questa scelta è stata ampiamente supportata dall’alto livello di prestazione termica raggiunta dall’involucro durante i mesi invernali che garantisce un bassissimo apporto di energia termica da fonti convenzionali. Per quanto riguarda invece le facciate est ed ovest, esse sono caratterizzate, al contrario delle precedenti, da una percentuale di superficie vetrata, rispetto a quella complessiva in muratura composta dalle pareti perimetrali isolate, maggiore, in quanto c’è la necessità di sfruttare l’illuminazione da fonte solare durante tutto l’anno. Infine, ma non meno importante, la progettazione della copertura a falda della casa è stata ipotizzata in modo tale da garantire due fattori: un bassissimo

coefficiente di trasmittanza termica e un'inclinazione ottimale per l'installazione degli impianti che sfruttano l'energia solare:

Copertura tetto a falda					
N	descrizione strato	s	lambda	R	αe
		m	W/(m K)	(m ² K)/W	
	resistenza termica superficiale esterna			0,043	23
1	tegola	0,01	0,99	0,010	
2	isolante (fibra di vetro pannello semirigido)	0,15	0,04	3,75	
3	impermeabilizzante barriera al vapore in bitume	0,002	0,17	0,011	
4	soletta in cls armato(e tabelloni forati)	0,2	1,16	0,312	
5	malta di gesso con inerti	0,02	0,29	0,068	
	resistenza termica superficiale interna			0,107	9,3
	Spessore totale	0,382			
	Rt	4,304			
	Ut	0,232			

tabella 6: descrizione strato copertura a falda

con:

resistenza unitaria di strato: $R = \frac{s}{\lambda}$;

resistenza termica superficiale : $Rs_{e,i} = \frac{1}{\alpha_{e,i}}$;

con $\alpha_{e,i}$ coefficiente di adduttanza;

coefficiente di trasmissione del calore: $U = \frac{1}{R}$.

Si trova la trasmissione del tetto sommando i singoli contributi di ogni strato:

- $U_{\text{tetto}} = 0,232 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$;
- 30° di inclinazione rispetto al piano orizzontale, ed orientamento dell'azimuth pari a 0°; valori che permettono di massimizzare la producibilità elettrica e termica delle tecnologie fotovoltaiche durante tutto l'anno.

Le caratteristiche tecniche della casa sono state definite inizialmente, scegliendo quelle soluzioni che garantiscono di ottenere un alto livello prestazionale della casa, in termini di trasmissione del calore e di riduzione dei ponti termici.

In pratica le soluzioni che si sono adottate sono:

- rivestimento isolante “a cappotto” esterno;
- installazione di aperture vetrate a triplo vetro camera.

2.1.4 Rivestimento isolante “a cappotto” esterno

N	descrizione strato	s	R	αe
---	--------------------	---	---	----

	(da interno ad esterno)	m	(m ² K)/W	
	adduttanza interna	0	0,142	23
1	intonaco di calce e gesso	0,015	0,016	
2	mattoni forati laterizio	0,2	0,684	
3	isolamento a cappotto	0,1	2,941	
4	forati	0,12	0,370	
5	malta di calce e/o cemento	0,015	0,016	
	adduttanza esterna	0	0,05	20
	spessore totale	0,45		
	Rt	4,222		
	Ut	0,236		

tabella 7: descrizione strato pareti perimetrali con intercapedine isolato a cappotto esterno

2.1.5 Installazione di aperture vetrate a triplo vetro camera basso-emissive

La scelta di questa tipologia di vetrate è determinante se si vogliono ottenere dei valori finali di trasmittanza idonei. Di seguito si riporta una tabella in cui si riportano i valori limite della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi (W/m² K):

Zona climatica	Da 1 gennaio 2008	Da 1 gennaio 2010
A	5	4,6
B	3,6	3,0
C	3,0	2,6
D	2,8	2,4
E	2,4	2,2
F	2,2	2,0

tabella 8: i valori limite della U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi (W/m² K)

Il calcolo dettagliato della trasmittanza è sviluppato secondo la norma UNI EN 673:

La resistenza complessiva è:

$$R = R_e + R_t + R_i$$

$$R_e = \frac{1}{h_e};$$

con:

he: il coefficiente di scambio termico esterno normalizzato in 23 W/(m²K)

$$R_i = \frac{1}{h_i};$$

con:

h_i = h_r + h_c : è il coefficiente di scambio termico interno

con:

h_r: conduttanza convettiva (5,26 * ε □ W/(m² K))

con:

e: emissività corretta della superficie (per il vetro sodo-calcico non trattato e = 0,837)

h_c: conduttanza convettiva = 3,6 (W/m² K) se la convezione è naturale.

$$R_t = R_s + R_v$$

con:

R_v = resistenza termica totale dei vetri;

R_s = resistenza termica totale delle intercapedini.

Per ogni vetro si ha:

$$R_v = s \cdot r$$

con:

s: spessore del vetro;

$$r = \frac{1}{\lambda} \text{ (resistività termica del vetro (= } 1.0 \text{ (m} \cdot \text{K)/W))}$$

$$R_s = 1/(h_r + h_g)$$

con:

h_r conduttanza radiativi;

h_g conduttanza del gas;

$$h_r = T_3 \cdot 4 \sigma \epsilon / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)$$

σ : costante di Stefan-Boltzmann (= $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$);

ϵ_1, ϵ_2 : emissività corrette della superficie rivolta all'intercapedine

Nota: generalmente si fornisce per il rivestimento l'emissività normale. Occorre moltiplicare l'emissività normale per dei coefficienti correttivi compresi tra 1,22 e 0,94 per emissività normali che vanno da 0,03 a 0,89)

T: temperatura assoluta media del gas (K)

$$h_g = \frac{Nu \cdot \lambda}{s}$$

s: spessore dell'intercapedine

λ : conduttività termica del gas

Nu: numero di Nusselt

Si ha:

vetrate verticali	$Nu = 0,035 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,38}$
vetrate orizzontali - calore ascendente	$Nu = 0,16 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,28}$
vetrate a 45° - calore ascendente	$Nu = 0,10 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,31}$
vetrate non verticali- calore discendente	$Nu = 1$

tabella 9: valori di Nu per diversi tipi di vetrate

- $Gr = 9,81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2 / (T_m \cdot \mu^2)$; numero di Grashof;
- $Pr = \mu \cdot c / \lambda$; numero di Prandtl;
- ΔT : differenza di temperatura tra le superfici che delimitano l'intercapedine;
- ρ : massa volumica;
- μ : viscosità dinamica;
- c: capacità termica specifica;
- T_m : temperatura media.

Nota: se, dai calcoli si ha $Nu < 1$ si prende $Nu = 1$: indica che il flusso di calore avviene solo per conduzione attraverso il gas. Quando $Nu > 1$ significa che, oltre alla conduzione esiste la

conduzione per convezione. La seguente tabella riporta le proprietà dei gas puri usati per le vetrate isolanti.

NB: Per le miscele di gas la generica proprietà P si può calcolare dalle proprietà $P1$ e $P2$ dei gas componenti in base alla loro frazione volumica $F1$, $F2$ ecc.

Quindi $P = F1 \cdot P1 + F2 \cdot P2$.

Gas	T_m (°C)	r (kg/m ³)	m (kg / (m · s))	l (W / (m · K))	c J / (kg · K)
Aria	-10	1.326	1.66E-05	0.023	1,008x10 ⁻³
	0	1.277	1.71E-05	0.024	
	10	1.232	1.76E-05	0.024	
	20	1.189	1.81E-05	0.025	
Argon	-10	1.829	2.04E-05	0.015	0,519x10 ⁻³
	0	1.762	2.1E-05	0.016	
	10	1.699	2.16E-05	0.016	
	20	0,086	2.23E-05	0.017	
SF6	-10	6.844	1.38E-05	0.011	0,614x10 ⁻³
	0	6.602	1.42E-05	0.011	
	10	6.36	1.46E-05	0.012	
	20	6.118	1.49E-05	0.013	
Cripto	-10	3.832	2.26E-05	0.008	0,245x10 ⁻³
	0	0,172	2.33E-05	0.008	
	10	3.56	2.4E-05	0.009	
	20	3.43	2.47E-05	0.009	

Condizioni al contorno normalizzate

Il valore di U_g dipende dalle condizioni ambientali in cui sarà installato il vetro, principalmente di temperatura e di ventilazione. Se queste non sono esattamente specificate occorre riferirsi a valori standard definite dalla Norma UNI EN 673.

r	resistività del vetro sodico-calcico	1,0 m K/W
e	emissività del vetro sodico-calcico puro	0,837
DT	differenza di temperatura tra le superfici del vetro	15 K
T_m	temperatura media dell'intercapedine	283 K
s	costante di Stefan-Boltzmann	= 5.67*10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)
h_e	coefficiente di scambio termico esterno di superfici di vetro sodico-calcico	23 W/(m ² K)
h_i	coefficiente di scambio termico interno di superfici di vetro sodico-calcico	8 W/(m ² K)
A	costante	0,035
n	esponente	0,38
T_p	temperatura di riferimento per le proprietà	283 K

tabella 10: valori standard definite dalla Norma UNI EN 673.

Esempio di calcolo

Triplo – Vetro camera con vetro esterno chiaro di spessore 10 mm ($\epsilon = 0,837$ corretta a 0,79), vetro interno basso-emissivo (rivestimento in faccia 3: NB faccia 1 è convenzionalmente l'esterna) di spessore 6 mm ($\epsilon = 0,048$ corretta a 0,056) ed intercapedine con Argo da 12 mm.

$$R_e = 1/23 = 0,0434 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

$$R_i = 1/8 = 0,125 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

$$h_r = 2833 \cdot 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} / (1/0,837 + 1/0,056 - 1) = 5,14 / (1,27 + 17,9 - 1) = 0,284 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

$$Gr = 9,81 \cdot 0,0123 \cdot 15 \cdot 1,6992/283 \cdot 2,16 \cdot 10^{-10} = 7340000/1320 = 5560$$

$$Pr = 2,16 \cdot 10^{-5} \cdot 50,519/0,01684 = 66,5 \cdot 10^{-5}$$

$$Nu = 0,035 \cdot (5560 \cdot 66.5 \cdot 10^{-5}) - 0,38 = 0,035 \cdot (3,7) - 0,38 = 0,021 (<1, \text{ quindi } Nu=1)$$

$$h_g = 0,01684/0,012 = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$R_s = 1/(0,284+1,4) \cdot 2 = 1,184 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$$

$$R_v = 0,01 \cdot 1 \cdot 3 = 0,03 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$$

$$R_t = 1,214 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$$

$$R = 1,383 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W};$$

$$U_g = 1/R = 0,723 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

Si osservi la determinante importanza del vetro basso-emissivo. Con vetro normale si avrebbe

$$h_r = 2833 \cdot 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8}/(1/0,837+1/0,837-1) = 5,14/(1,27+1,27-1) = 3,34 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$R_s = 1/(3,34+1,4) = 0,211 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$$

$$R_t = 0,211 + 0,014 = 0,225 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W};$$

$$R = 0,0434 + 0,125 + 0,225 = 0,393 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W};$$

$$U_g = 1/R = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}).$$

Si riportano di seguito i valori di trasmittanza ottenuti per il vetro e per il telaio, inoltre si riportano pure i dati geometrici caratteristici delle aperture; come possiamo vedere qui di seguito, si prendono in considerazione tre tipologie di infissi, aventi le stesse caratteristiche fisiche ma diversa geometria:

Infisso 1:

	area	trasmittanza
infisso 1(2x1)	2,0144	1,678
vetro	1,6544	0,723
Telaio: in rovere	0,36	2,2
Numero	F _f : rapporto tra telaio e area totale infisso	
5	0,17	

Infisso 2:

	area	trasmittanza
infisso 2(1x1)	1,0144	1,151
vetro	0,7744	0,723
Telaio: in rovere	0,24	2,2
Numero	F _f : rapporto tra telaio e area totale infisso	
9	0,23	

Infisso 3:

	area	trasmittanza
infisso 3(2x1,5x2,6)	0,8844	1,572
vetro	0,6072	0,723
Telaio: in rovere	0,2772	2,2
Numero	F _f : rapporto tra telaio e area totale infisso	
9	0,23	

2.2 Calcolo fabbisogno termico edificio

Nella procedura di calcolo si è fatto uso della norma UNI-TS 11300 2009 e integrata dove richiesto dalla norma UNI EN ISO 13790-2008, idonea al calcolo per quantificare i fabbisogni di energia termica per il riscaldamento invernale ed il raffrescamento estivo

dell'involucro edilizio in esame. Di seguito si riportano le tabelle di trasmittanza e di ventilazione dei locali della casa; su tali superficie è stato fatto il calcolo in funzione dei materiali e dei manufatti previsti di installazione.

2.2.1 Calcolo della trasmittanza dei componenti opachi e dei ponti termici

In questa parte dello studio si eseguono quei calcoli utili alla definizione delle caratteristiche fisiche risultanti in funzione delle ipotesi progettuali avanzate in precedenza; in particolare si procederà a calcolare la trasmittanza globale degli elementi opachi previsti nella casa:

- $U_{\text{pareti perimetrali}} = 0,236 \text{ W/m}^2 \text{ K}$;
- $U_{\text{solaio pianoterra}} = 0,374 \text{ W/m}^2 \text{ K}$;
- $U_{\text{solaio primo piano}} = 0,616 \text{ W/m}^2 \text{ K}$;
- $U_{\text{tetto}} = 0,232 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

I valori trovati alla fine della procedura serviranno al calcolo del fabbisogno annuale per il riscaldamento, secondo la norma di pertinenza UNI-TS 11300.

A titolo di esempio si riporta di seguito il calcolo completo eseguito su un locale della casa; per quanto riguarda i restanti, si riportano le tabelle del calcolo risultante:

cucina						
tipo superficie	trasmittanza U	superficie A	A x U	esposizi one.	coefficiente d'esposizione	Ht1
	(W/m ² K)	m ²	W/K			W/K
isolamento a cappotto	0,236	7,785	1,8	N	1,17	2,2
isolamento a cappotto	0,236	6,285	1,5	E	1,12	1,7
infisso2	1,151	1,014	1,2	N	1,17	1,4
infisso1	1,678	2,014	3,4	E	1,12	3,8
						9,0

ponti termici										
	s1	U1	s2	U2	s	U	Rm	Y	I	Ht2
	m	(W/m ² K)	m	(W/m ² K)	m	(W/m ² K)	m ² K/W	W/m	m	W/K
finestre	0,4				0,4	0,138	0,48	0,21	10	2,1
angolo T	0,4	0,236	0,4	0,236	0,4	0,236	0,6	0,02	2,75	0,1
pilastro	0,4	0,236	0,4	0,236	0,4	0,236	0,6	0,18	2,75	0,5
pilastro	0,4	0,236	0,4	0,236	0,4	0,236	0,6	0,00	2,75	0,0
tramezzi	0,4	0,236			0,4	0,118	0,6	0,02	2,75	0,1
tramezzi	0,4	0,236			0,4	0,118	0,6	0,02	2,75	0,1
solaio	0,56	0,374			0,56	0,187	0,26	0,04	5	0,2
soffitto	0,25				0,25	0,990	0,86	0,10	5	0,5
										3,4
Trasmittanza termica totale vano cucina:										12.41

tabella 11: calcolo trasmittanze termiche vano cucina

Il calcolo di H_D include il contributo dei ponti termici:

$$H_D = \sum A_i * U_i + \sum l_k * \Psi_k + \sum \chi_j$$

dove:

A_i : è l'area dell'elemento i-esimo dell'involucro dell'edificio, in m^2 ;

U_i : è la trasmittanza termica dell'elemento i-esimo dell'involucro dell'edificio;

l_k : è la lunghezza del ponte termico lineare k-esimo, in m;

Ψ_k : è la trasmittanza termica lineare del ponte termico lineare k-esimo, in $W/(m \cdot K)$;

χ_j : è la trasmittanza termica puntuale del ponte termico puntuale j-esimo, in W/K .

Generalmente l'influenza dei ponti termici puntuali può essere trascurata, ma nel caso ci siano ponti termici puntuali significativi la loro trasmittanza termica puntuale può essere calcolata in accordo con la ISO 10211.

I ponti termici lineari sono generalmente disposti nei seguenti punti dell'edificio:

- giunzioni fra elementi esterni;
- giunzioni di muri interni con muri esterni e tetti;
- giunzioni fra solai intermedi e pareti esterne;
- colonne dei muri esterni;
- attorno a finestre e porte.

$$\Psi = \frac{(0,9 * s)}{(1,25 + Rm)}$$

dove:

s : è la media delle lunghezze degli elementi lungo le due dimensioni;

U : è la media delle trasmittanze degli elementi lungo le due dimensioni.

Adesso riporto lo schema generale delle trasmittanze calcolate dei restanti vani della casa indicandone i valori finali:

ingresso					
tipo superficie	trasmittanza U	Ht1	ponti termici	Ht2	Ht tot
	(W/m^2K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	0,8	porta	1,8	
isolamento a cappotto	0,236	2,2	pilastro	0,5	
porta ingresso	2	7,0	tramezzi	0,1	
			tramezzi	0,1	
			solaio	0,2	
		10,0	totale	2,6	12,60

bagno

tipo superficie	trasmissione U	H _{t1}	ponti termici	H _{t2}	H _{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	1,4	finestre	0,8	
isolamento a cappotto	0,236	1,5	angolo	0,1	
infisso2	1,151	1,4	pilastro	0,5	
			tramezzi	0,1	
			solaio	0,1	
			soffitto	0,1	
		4,2	totale	1,6	

soggiorno-vano scale					
tipo superficie	trasmissione U	H _{t1}	ponti termici	H _{t2}	H _{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	4,4	finestre	5,0	
isolamento a cappotto	0,236	1,6	angolo T	0,1	
isolamento a cappotto	0,236	0,7	pilastro	0,5	
infisso1	1,678	3,8	pilastro	0,0	
infisso1	1,678	10,9	tramezzi	0,1	
			tramezzi	0,1	
			solaio	0,3	
			soffitto	0,7	
		21,3	totale	6,7	27,99

studio					
tipo superficie	trasmissione U	H _{t1}	ponti termici	H _{t2}	H _{t tot}
	(W/m ² K)	W/K	W/K	W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	1,8	finestre	2,3	
isolamento a cappotto	0,236	1,6	angolo	0,1	
infisso1	1,678	2,9	pilastro	0,0	
infisso2	1,151	0,9	pilastro	0,0	
			tramezzi	0,1	
			tramezzi	0,1	
			solaio	0,3	
			soffitto	0,7	
		3,3	totale	3,4	6,77

corridoio					
tipo superficie	trasmissione U	H _{t1}	ponti termici	H _{t2}	H _{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K

isolamento a cappotto	0,236	1,4	finestre	2,9	
isolamento a cappotto	0,236	4,4	angolo	0,0	
infisso1	1,678	2,9	pilastro	0,6	
infisso3	1,572	3,0	angolo T	0,0	
copertura sottotetto riscaldato	0,232	3,8	tramezzi	0,2	
copertura sottotetto riscaldato	0,232	3,7	solaio	0,5	
			tetto	1,1	
		19,2	totale	5,3	24,49

camera letto 1					
tipo superficie	trasmissione U	H_{t1}	ponti termici	H_{t2}	H_{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	1,7	finestre	2,1	
isolamento a cappotto	0,236	0,6	angolo	0,0	
infisso1	1,678	4,0	pilastro	0,4	
infisso3	1,572	1,6	pilastro	0,0	
copertura sottotetto riscaldato	0,232	4,1	tramezzi	0,2	
			solaio	0,4	
			tetto	0,7	
		11,8	totale	3,7	15,46

camera letto 2					
tipo superficie	trasmissione U	H_{t1}	ponti termici	H_{t2}	H_{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	1,5	finestre	0,8	
infisso1	1,678	3,4	pilastro	0,2	
infisso3	1,572	1,6	pilastro	0,0	
copertura sottotetto riscaldato	0,232	2,1	tramezzi	0,2	
			tetto	0,3	
			solaio	0,1	
		8,5	totale	1,5	10,08

camera letto 3					
tipo superficie	trasmissione U	H_{t1}	ponti termici	H_{t2}	H_{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	2,3	finestre	2,1	

infisso2	1,151	1,2	angolo	0	
infisso3	1,572	1,6	pilastro	0,2	
copertura sottotetto riscaldato	0,232	2,4	tramezzi	0,2	
			solaio	0,3	
			tetto	0,5	
		7,4	totale	3,2	10,64

bagno 2					
tipo superficie	trasmittanza U	H_{t1}	ponti termici	H_{t2}	H_{t tot}
	(W/m ² K)	W/K		W/K	W/K
isolamento a cappotto	0,236	1,1	finestre	0,8	
isolamento a cappotto	0,236	0,8	angolo	0,0	
Infisso 2	1,151	1,4	pilastro	0,2	
copertura sottotetto riscaldato	0,232	2,3	tramezzi	0,1	
			solaio	0,1	
			tetto	0,4	
		5,6	totale	1,7	7,31

2.2.2 Calcolo dello scambio termico di ventilazione

Di seguito riporto il calcolo dello scambio termico di ventilazione per una zona tipo dell'involucro oggetto dello studio; si nota come viene fissato un valore di n (ricambio d'aria) = 0,3 h⁻¹:

Soggiorno-vano scale					
area	h	volume	n	H_v	H_{vtot}
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K	W/K
35,2	2,75	96,80	0,3	9,7	
area	h	volume	n	H_v	
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K	
7,8	2,75	21,45	0,3	2,1	11,85

$$H_v = 0,24 \cdot 1,16 \cdot 1,2 \cdot V \cdot n = [W/K];$$

Di seguito riporto i coefficienti di scambio termico per ventilazione dei restanti vani della casa:

cucina					ingresso				
area	h	volume	n	H_v	area	h	volume	n	H_v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K	m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
14,9	2,75	40,98	0,3	4,1	6,6	2,75	18,15	0,3	1,8

studio				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
12	2,75	33,00	0,3	3,3

Bagno				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
4,12	2,75	11,33	0,5	1,9

Corridoio				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
23,4	2,9	67,86	0,3	6,8

camera 1				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
16,13	2,9	46,777	0,3	4,7

camera 2				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
11,28	2,9	32,712	0,3	3,3

camera 3				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
11,5	2,9	33,35	0,3	3,3

Bagno				
area	h	volume	n	H _v
m ²	m	m ³	h ⁻¹	W/K
9,6	2,9	27,84	0,5	4,7

2.2.3 Calcolo del fabbisogno termico dell'edificio secondo la UNI-TS 11300

La UNI EN ISO 13790:2008 ed in Italia la norma UNI-TS 11300 presentano una serie di metodi di calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento ambiente di un edificio e dell'influenza delle perdite degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, del recupero termico e dell'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile.

Tale norma può essere utilizzata per le seguenti applicazioni:

1. valutare il rispetto di regolamenti espressi in termini di obiettivi energetici;
2. confrontare le prestazioni energetiche di varie alternative progettuali per un edificio in progetto;
3. indicare un livello convenzionale di prestazione energetica degli edifici esistenti;
4. stimare l'effetto di possibili misure di risparmio energetico su un edificio esistente, calcolando il fabbisogno di energia con e senza ciascuna misura;
5. prevedere le esigenze future di risorse energetiche su scala nazionale o internazionale, calcolando i fabbisogni di energia di tipici edifici rappresentativi del parco edilizio.

I metodi forniti dalla UNI EN ISO 13790:2008 comprendono il calcolo dei seguenti termini:

- 1) lo scambio termico per trasmissione e ventilazione dell'edificio quando esso è riscaldato o raffrescato ad una temperatura interna costante;

- 2) il contributo degli apporti termici interni e solari al bilancio termico dell'edificio;
- 3) i fabbisogni annuali di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, al fine di mantenere le temperature prefissate di regolazione all'interno dell'edificio.

L'edificio può avere diverse zone termiche a differenti temperature di regolazione e può avere un riscaldamento intermittente. I possibili intervalli di calcolo sono diversi: l'anno, il mese, l'ora. Si è scelto un intervallo di calcolo mensile, settando la temperatura interna costante a seconda della stagione di riferimento; in pratica ho scelto la temperatura di 20°C per i mesi invernali e di 26°C per i mesi estivi. Così facendo e utilizzando i dati relativi alla zona in particolare quelli della temperatura media esterna forniti, riesco a calcolare le differenze di temperatura tra interno ed esterno.

La procedura di calcolo comprende i seguenti passi:

- definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio;
- definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richiesta;
- definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
- calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e il raffrescamento ($Q_{C,nd}$);
- aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi ed alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

Al punto 4 della procedura i fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento si calcolano, per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, come:

$$Q_{H,nd} = H_{H,ht} - \eta_{H,gn} \times Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \times (Q_{int} + Q_{sol})$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \times Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \times (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

2.2.4 Calcolo degli scambi termici

Nel caso di riscaldamento:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \times t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \times \phi_{r,mn,k} \right\} \times t$$

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \times (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \times t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \times \phi_{r,mn,k} \right\} \times t$$

Nelle equazioni riportate qui sopra compaiono i coefficienti di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ e ventilazione $H_{ve,adj}$:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A$$

in cui:

H_D : è il coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno; esso non è altro che il coefficiente trovato in precedenza per ogni zona dell'edificio;

H_g : è il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno:

$$H_g = A \times U_f \times b_{tr,g}$$

dove:

A: è l'area dell'elemento;

$U_f = 0,374 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; è la trasmittanza termica della parte sospesa del pavimento (tra l'ambiente interno e lo spazio sottopavimento);

con:

$b_{tr,g} = 0,45$ (è dato dal prospetto 6, e si riferisce ad un pavimento contro-terra);

H_U : è il coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati; esso risulta nullo in quanto si è ipotizzato che non vi sono locali non climatizzati adiacenti a quelli climatizzati;

H_A : è il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone (interne o meno all'edificio) climatizzate a temperatura diversa; esso risulta nullo poiché tutte le zone dell'edificio sono climatizzate alla stessa temperatura.

Sono dei valori che rimangono fissi durante tutto l'anno, poiché sono caratteristiche fisiche dell'involucro.

solaio piano-terra					
N	descrizione strato	s	lambda	C	R
		m	W/m K	W/m ² K	m ² K/W
	αi=8				0,13
1	intonaco tradizionale	0,015	0,9		0,016
2	solaio	0,25	0,72		0,347
3	materiale isolante pannelli rigidi	0,06	0,04		1,5
4	camera d'aria	0,08		7	0,142
5	tavellone laterizio	0,06	0,35		0,171
6	massetto cls cellulare	0,06	0,29		0,206
7	manto impermeabile	0,015	0,18		0,083
8	piastrella in ceramica	0,02	0,72		0,027
	αe=20				0,05
	Spessore totale	0,56			
	Rt	2,67			
	Ut	0,374			

tabella 12: descrizione strato solaio piano-terra

Per quanto riguarda le temperature, si è fissata quella interna pari a 20°C durante il periodo di riscaldamento che ha una durata fissa che va dal 15 ottobre al 15 aprile per la zona in esame, e di 26°C durante il periodo di raffrescamento.

La temperatura esterna è stata ricavata da una tabella che considera diversi dati relativi alla zona in cui si ipotizza di collocare l'immobile:

	gen	febr	marzo	apr	magg	giu	lug	ago	sett	ott	nov	dic
T_{x,med}	7,2	7,9	9,8	12,6	18,3	23,6	26,7	26,9	22,6	16,9	12,5	8,8

tabella 13: temperature medie esterne Comune di Enna

Il calcolo di $F_{r,k}$ e $\Phi_{r,mn,k}$ è effettuato secondo quanto riportato nella UNI EN ISO 13790:2008 e secondo le indicazioni del punto 11.4.:

$F_{r,k}$ è il fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste:

$$F_r = \frac{F_{sh,ob,dif} (1 + \cos S)}{2}$$

dove:

$F_{sh,ob,dif}$: è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo alla sola radiazione diffusa, pari a 1 in assenza di ombreggiature da elementi esterni;

S : è l'angolo di inclinazione del componente sull'orizzontale:

$$F_r = \frac{1 \times (1 + \cos 90^\circ C)}{2} = 0,5$$

dove:

$\Phi_{r,mn,k}$: è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio k -esimo, mediato sul tempo:

$$\phi_r = R_{se} \times U_c \times A_c \times h_r \times \Delta\theta_{er}$$

dove:

R_{se} : è la resistenza superficiale esterna dell'elemento opaco pari a 0,05 (m² K)/W;

A_c : è l'area dell'elemento opaco generico;

$h_r = 5 \cdot \varepsilon$ W/(m² K), il coefficiente di scambio termico esterno per irraggiamento con $\varepsilon = 0,9$;

$\Delta\theta_{er} = 11$ K; la differenza tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo.

Nel caso di raffrescamento:

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \times t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \times \phi_{r,mn,k} \right\} \times t$$

$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} \times (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \times t$$

Per quanto riguarda il calore trasmesso per ventilazione ho fissato un valore di portata $q_{ve,k,mn} = 0,3$ m³/sec.

2.2.5 Calcolo degli apporti termici

Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, gli apporti termici si calcolano con le seguenti formule:

$$Q_{int} = \left\{ \sum_k \phi_{int,mn,k} \right\} \times t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \times \phi_{int,mn,u,l} \right\} \times t$$

$$Q_{sol} = \left\{ \sum_k \phi_{sol,mn,k} \right\} \times t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \times \phi_{sol,mn,u,l} \right\} \times t$$

dove le due sommatorie si riferiscono rispettivamente ai flussi entranti/generati nella zona climatizzata e negli ambienti non climatizzati, ed inoltre:

$b_{tr,l}$: è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna l -esima oppure il flusso termico l -esimo di origine solare;

$\Phi_{int,mn,k}$: è il flusso termico prodotto dalla k -esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo;

$\Phi_{int,mn,u,l}$: è il flusso termico prodotto dalla l -esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente u , mediato sul tempo;

$\Phi_{sol,mn,k}$: è il flusso termico k -esimo di origine solare, mediato sul tempo;

$\Phi_{sol,mn,u,l}$: è il flusso termico l -esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u , mediato sul tempo.

Il flusso termico k -esimo di origine solare, $\Phi_{sol,k}$, espresso in W, si calcola con la seguente formula:

$$\phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k}$$

dove:

$F_{sh,ob,k}$: è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k -esima;

$A_{sol,k}$: è l'area di captazione solare effettiva della superficie k -esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato;

$I_{sol,k}$: è l'irradianza solare media mensile, sulla superficie k -esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale.

L'area di captazione solare effettiva di un componente vetrato dell'involucro (per esempio una finestra), A_{sol} , è calcolata con la seguente formula:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{w,p}$$

dove:

$F_{sh,gl}$: è il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili:

$$F_{sh,gl} = \frac{[(1 - f_{sh,with}) g_{gl} + f_{sh,with} g_{gl} + sh]}{g_{gl}}$$

dove:

g_{gl+sh} : è la trasmittanza di energia solare totale della finestra, quando la schermatura solare è utilizzata; in assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, il fattore di assorbimento solare di un componente opaco può essere assunto pari a 0,3 per colore chiaro della superficie esterna, 0,6 per colore medio e 0,9 per colore scuro; fisso $g_{gl+sh} = 0,9$

$f_{sh,with}$: è la frazione di tempo in cui la schermatura solare è utilizzata, pesata sull'irraggiamento solare incidente; essa dipende dal profilo dell'irradianza solare incidente sulla finestra e quindi dal clima, dalla stagione e dall'esposizione; Per ciascun mese e per ciascuna esposizione il valore di $f_{sh,with}$ può essere ricavato come rapporto tra la somma dei valori orari di irradianza maggiori di 300 W/m² e la somma di tutti i valori orari di irradianza del mese considerato.

Mese	nord	est	sud	ovest
1	0,00	0,52	0,81	0,39
2	0,00	0,48	0,82	0,55
3	0,00	0,66	0,81	0,63
4	0,00	0,71	0,74	0,62

5	0,00	0,71	0,62	0,64
6	0,00	0,75	0,56	0,68
7	0,00	0,74	0,62	0,73
8	0,00	0,75	0,76	0,72
9	0,00	0,73	0,82	0,67
10	0,00	0,72	0,86	0,60
11	0,00	0,62	0,84	0,30
12	0,00	0,50	0,86	0,42

tabella 14: fattore di riduzione per schermature mobili, $f_{sh,with}$

Nella valutazione di progetto o nella valutazione standard i valori di $f_{sh,with}$ devono essere ricavati dal prospetto 15 in funzione del mese e dell'orientamento. Per orientamenti non considerati nel prospetto 15, si procede per interpolazione lineare.

g_{gl} : è la trasmittanza di energia solare della parte trasparente del componente, quando la schermatura solare non è utilizzata; i valori della trasmittanza di energia solare totale degli elementi vetrati (g_{gl}) possono essere ricavati moltiplicando i valori di trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale ($g_{gl,n}$) per un fattore di esposizione (F_w) assunto pari a 0,9; considero triplo-vetrocamera basso emissivo:

$$g_{gl} = F_w \cdot g_{gl,n} = 0,9 \cdot 0,5 = 0,45$$

dove:

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

$A_{w,p}$: è l'area proiettata totale del componente vetrato (l'area del vano finestra).

L'area di captazione solare effettiva di una parte opaca dell'involucro edilizio, A_{sol} , è calcolata con la seguente formula:

$$A_{sol} = \alpha_{sol,c} R_{se} U_c A_c$$

dove:

$\alpha_{sol,c}$: è il fattore di assorbimento solare del componente opaco;

R_{se} : è la resistenza termica superficiale esterna del componente opaco, determinato secondo la UNI-EN ISO 6946;

U_c : è la trasmittanza termica del componente opaco;

A_c : è l'area proiettata del componente opaco.

Per il calcolo degli apporti termici da fonte solare ho utilizzato i dati da fonte ENEA-SOLTERM, riferiti ad ogni superficie considerando la corretta inclinazione e orientamento rispetto all'azimuth. In particolare, ho aggiunto una quantità specifica di flusso calore per radiazione per quei locali che sono prossimi ad un ambiente non riscaldato esterno a sua volta direttamente irraggiato (zona studio). Dalla norma ho preso tutti quei dati ed informazioni che è possibile desumere se non si è in possesso di dati certi, visto che il modello iniziale è frutto anche di alcune supposizioni fatte su schermature degli infissi. I dati sono stati calcolati in base al prospetto 15 del paragrafo 14.3.4 Per quanto riguarda gli apporti termici, si sono utilizzati i prospetti 8, 9, 10 e 11, 12 della norma nazionale corrente per una valutazione di

progetto o standard. Per gli edifici di categoria E.1 (1) e E.1 (2) (abitazioni), aventi superficie utile di pavimento, A_f , minore o uguale a 170 m^2 , il valore globale degli apporti interni, espresso in W , è ricavato come:

$$\phi_{\text{int}} = 5,294 \times A_f - 0,01557 \times A_f^2$$

A questi vado ad aggiungere gli apporti termici dovuti agli occupanti e alle apparecchiature:

- soggiorno e cucina = 9 W/m^2 ;
- altre aree climatizzate (stanza da letto) = 3 W/m^2

Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)

Giorni	Ore	Soggiorno e cucina ($\phi_{\text{int,OC}} + \phi_{\text{int,A}}/A_f$) W/m ²	Altre aree climatizzate (per esempio stanza da letto) ($\phi_{\text{int,OC}} + \phi_{\text{int,A}}/A_f$) W/m ²
Lunedì - Venerdì	07.00 - 17.00	8,0	1,0
	17.00 - 23.00	20,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	2,67
Sabato - Domenica	07.00 - 17.00	8,0	2,0
	17.00 - 23.00	20,0	4,0
	23.00 - 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	3,83
Media		9,0	3,0

figura 4: profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)

2.2.6 Portata di ventilazione

Valutazione di progetto o standard

Nel caso di aerazione o ventilazione naturale:

- per gli edifici residenziali si assume un tasso di ricambio d'aria pari a $0,3 \text{ vol/h}$;
- per tutti gli altri edifici si assumono i tassi di ricambio d'aria riportati nella UNI 10339.

I valori degli indici di affollamento sono assunti pari al 60% di quelli riportati nella suddetta norma ai fini della determinazione della portata di progetto. Per gli edifici dotati di sistemi di ventilazione meccanica a semplice flusso (aspirazione) il tasso di ricambio d'aria è fissato pari a:

$$q_{ve} = q_{ve,des} k$$

dove:

$q_{ve,des}$: è la portata d'aria di progetto e k è un coefficiente di contemporaneità di utilizzo delle bocchette aspiranti. In assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, si può assumere $k = 1$ per sistemi a portata fissa, $k = 0,6$ per ventilazione igro - regolabile.

2.2.7 PARAMETRI DINAMICI

Fattori di utilizzazione per riscaldamento

Il fattore di utilizzazione degli apporti termici per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento si calcola come:

$$\text{se } \gamma_H > 0 \text{ e } \gamma_H \neq 1: \quad \eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H + 1}}$$

$$\text{se } \gamma_H = 1 \qquad \eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1}$$

dove:

$$\gamma_H = \frac{Q_{gn}}{Q_{H,ht}} \qquad a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}}$$

dove:

τ : è la costante di tempo termica della zona termica, espressa in ore, calcolata come rapporto tra la capacità termica interna della zona termica considerata (C_m) e il suo coefficiente globale di scambio termico, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno - esterno (vedere punto 12.2.1.3 della UNI EN ISO 13790:2008). Con riferimento al periodo di calcolo mensile si può assumere $a_{H,0} = 1$ e $\tau_{H,0} = 15$ h.

Raffrescamento

Il fattore di utilizzazione dello scambio termico per il calcolo del fabbisogno di raffrescamento si calcola come:

$$\text{se } \gamma_C > 0 \text{ e } \gamma_C \neq 1: \qquad \eta_{C,ls} = \frac{1 - \gamma_C^{-a_C}}{1 - \gamma_C^{-(a_C+1)}}$$

$$\text{se } \gamma_C = 1 \qquad \eta_{C,ls} = \frac{a_C}{a_C + 1}$$

$$\text{se } \gamma_C < 0: \qquad \eta_{C,ls} = 1$$

$$\gamma_C = \frac{Q_{gn}}{Q_{C,ht}} \qquad a_C = a_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} - k \frac{A_w}{A_f}$$

dove:

A_w : è l'area finestrata;

A_f : è l'area di pavimento climatizzata.

Con riferimento al periodo di calcolo mensile si può assumere $a_{C,0} = 8,1$, $\tau_{C,0} = 17$ h e $k = 13$.

2.2.8 Esempio di calcolo per un vano della casa

categoria edificio	E.1 (1) o E.1 (2)		abitazione villini			
zona	fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento					
soggiorno – vano scale	$Q_{h,nd}$	$Q_{h,tr}$	$Q_{h,ve}$	$\eta_{h,gn}$	Q_{int}	Q_{sol}
gennaio	3225,07	4262	1410	0,178	1960,934	2380,437
febbraio	2490,95	3643	1204,58	0,135	1771,16	2864,663
marzo	2023,49	3410	1124,23	0,101	1960	3767,081
aprile	1143,19	2412,3	789,30	0,068	1897,67	4085,526
maggio	0	-0,864	-0,367	0	1960,934	4264,649
giugno	0	-4,852	-1,706	0	1897,67	4667,915
luglio	0	-8,290	-2,865	0	1897,67	5009,286
agosto	0	-8,072	-2,792	0	1897,67	4744,755
settembre	0	3,813	362,65	0,033	1897,67	3967,913
ottobre	338,17	1083,9	341,67	0,035	1897,67	3497,594
novembre	1405,33	2444,1	799,97	0,107	1897,67	2459,744
dicembre	2723,16	3737,7	1234,45	0,170	1897,67	2189,129
tot anno	13349	kWg	kWg		kWg	kWg

tabella 15: fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento

Di seguito riporto i calcoli che mi permettono di definire i valori delle colonne della tabella precedente:

valore globale degli apporti interni		apporti termici occupanti e dalle apparecchiature	
$\Phi_{int}(W)$	Af	Soggiorno e cucina	Altre aree climatizzate
198,853	43	9	3
tot apporti termici : 210,853			

tabella 16: valore globale degli apporti termici

$\Sigma_k \Phi_{int,mn,k}$	$\Sigma 1-b_{tr,l}$	$\Sigma \Phi_{int,mn,u,l}$
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
210,853	0	0
W		

zona	scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento						
soggiorno – vano scale	$Q_{h,tr}$	$H_{tr,adj}$	$\theta_{int,set,h}$	θ_e	t	$F_{r,k}$	$\Phi_{r,mn,k}$
gennaio	14207,1	35,229	20	7,2	31	0,5	14,699
febbraio	12141,712	35,229	20	7,9	28	0,5	14,699
marzo	11367,563	35,229	20	9,8	31	0,5	14,699
aprile	8041,5485	35,229	20	12,6	30	0,5	14,699
maggio	-864,2889	35,229	26	27	31	0,5	14,699
giugno	-4852,627	35,229	26	30,8	30	0,5	14,699
luglio	-8290,771	35,229	26	33,8	31	0,5	14,699
agosto	-8072,345	35,229	26	33,6	31	0,5	14,699
settembre	3813,949	35,229	26	22,6	30	0,5	14,699
ottobre	3613,442	35,229	20	16,9	31	0,5	14,699
novembre	8147,238	35,229	20	12,5	30	0,5	14,699
dicembre	12459,693	35,229	20	8,8	31	0,5	14,699
$Q_{h,tr,anno}(Wg)$	51712,216	W/K	°C	°C	giorni		W

tabella 17: scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento

coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto				
$H_{tr,adj}$	H_d	H_g	H_u	H_a
35,23	27,99	7,243	0	0
Scambio termico verso il terreno				
H_g	A	U_f	$b_{tr,g}$	
7,243	43	0,374	0,45	

tabella 18: coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto

soggiorno - vanoscale	$H_{ve,adi}$					
gennaio	11,85	maggio	11,85	settembre	11,85	
febbraio	11,85	giugno	11,85	ottobre	11,85	
marzo	11,85	luglio	11,85	novembre	11,85	
aprile	11,85	agosto	11,85	dicembre	11,85	
R_{se}	U_c	A_c	hr	$\Delta\theta_{er}$	t	$\Sigma 1-btr,l$
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	28	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	30	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	30	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	30	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	30	0,5
0,05	0,23	25,822	4,5	11	31	0,5
(m^2K)/W	W/(m^2K)	m^2	W/($m^2 \cdot K$)	K	giorni	
$\Sigma\Phi_{sol,mn,k}$	$\Sigma\Phi_{sol,mn,u,l}$	$\Phi_{sol,opaco}$	$\Phi_{sol,trasp}$	$I_{sol,est-v}$	$I_{sol,ovest-v}$	$I_{sol,sud-v}$
42,660	12,175	17,787	24,872	3,31	3,31	3,89
56,838	14,398	22,301	34,536	4,15	4,15	4,6
67,510	15,055	25,633	41,876	4,77	4,77	4,81
75,657	15,337	28,804	46,853	5,36	5,36	4,9
76,427	16,025	31,867	44,559	5,93	5,93	5,12
86,442	16,119	32,673	53,769	6,08	6,08	5,15
89,772	16,495	33,425	56,346	6,22	6,22	5,27
85,031	15,994	31,115	53,916	5,79	5,79	5,11
73,479	15,086	26,977	46,502	5,02	5,02	4,82
62,680	14,554	23,430	39,250	4,36	4,36	4,65
45,550	11,674	17,465	28,085	3,25	3,25	3,73
39,231	11,768	16,927	22,303	3,15	3,15	3,76
kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/ m^2	kWh/ m^2	kWh/ m^2

direzione	$A_{sol,opaco}$	$F_{sh,ob,k}$	$\alpha_{sol,c}$	R_{se}	U_c	A_c	g_{gl}
ovest	3,897	1	20	0,05	0,236	16,456	0,45
est	1,476	1	20	0,05	0,236	6,235	0,45

$f_{sh,with}$	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
ovest	0,39	0,55	0,63	0,62	0,64	0,68	0,73	0,72	0,67	0,6	0,3	0,42
est	0,52	0,48	0,66	0,71	0,71	0,75	0,74	0,75	0,73	0,72	0,62	0,5
$F_{sh,gl}$												
ovest	1,39	1,55	1,63	1,62	1,64	1,68	1,73	1,72	1,67	1,6	1,3	1,42
est	1,52	1,48	1,66	1,71	1,71	1,75	1,74	1,75	1,73	1,72	1,62	1,5
$A_{sol,trasp}$												
ovest	7,10	7,92	8,33	8,28	8,38	8,59	8,84	8,79	8,54	8,18	6,64	7,26
est	0,40	0,39	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,43	0,39

mesi	fattore di utilizzazione degli apporti termici riscaldamento
------	--

	$\eta_{H,gn}$	Y_H	a_H	$a_{H,0}$	$\tau_{H,0}$	Q_{gn}	$Q_{H,ht}$	τ	C_m
gennaio	0,178	4,597	1,001	1	15	85,884	18,681	0,0183	3112,5
febbraio	0,135	6,356	1,001			101,392	15,951		
marzo	0,101	8,873	1,001			132,105	14,887		
aprile	0,068	13,634	1,001			142,509	10,452		
maggio	#NUM!	-	1,001			148,691	-1,459		
giugno	#NUM!	-23,883	1,001			161,922	-6,779		
luglio	#NUM!	-15,241	1,001			173,512	-11,384		
agosto	#NUM!	-14,847	1,001			164,694	-11,092		
settembre	0,033	28,858	1,001			138,589	4,802		
ottobre	0,035	27,212	1,001			123,122	4,524		
novembre	0,107	8,337	1,001			88,317	10,593		
dicembre	0,178	4,863	1,001			79,507	16,346		
						kW	kW		
$(1 - F_f)$	$A_{w,p}$	q_{gl+sh}							
2,290	4,963	0,9							
0,763	0,774								

2.2.9 Fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il riscaldamento

Adesso si riporta il calcolo globale del fabbisogno ideale di calore per il riscaldamento dell'intera casa suddivisa in vani, per cui si troverà, avendo a disposizione la superficie di ogni singolo vano, il fabbisogno singolo e successivamente quello globale:

zona	P		Q_h		S		Q_h/S	
soggiorno - vanoscale	13349,39	kWg	556,224	kWh	43	m ²	12,935	kWh/m ²
cucina	5778,883	kWg	240,786	kWh	14,9	m ²	16,160	kWh/m ²
bagno1	2470,023	kWg	102,917	kWh	4,12	m ²	24,980	kWh/m ²
studio	3300,682	kWg	137,528	kWh	12	m ²	11,460	kWh/m ²
ingresso	5865,597	kWg	244,399	kWh	6,6	m ²	37,030	kWh/m ²
corridoio	8707,59	kWg	362,816	kWh	23,4	m ²	15,504	kWh/m ²

camera1	7991,945	kWg	332,997	kWh	16,13	m ²	20,644	kWh/m ²
camera2	4862,042	kWg	202,585	kWh	11,28	m ²	17,959	kWh/m ²
camera3	4877,182	kWg	203,215	kWh	11,5	m ²	17,670	kWh/m ²
bagno2	3928,65	kWg	163,693	kWh	9,6	m ²	17,051	kWh/m ²
totale anno casa	61131,99	kWg	2547,166	kWh	152,53	m ²	16,699	kWh/m²

tabella 19: Fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il riscaldamento

Capitolo 3 IMPIANTI A ENERGIA RINNOVABILE: IMPIANTO SOLARE TERMICO

Introduzione rinnovabili

Si definiscono rinnovabili quelle fonti di energia che possono essere considerate inesauribili, nel senso che il loro ciclo di produzione ha tempi compatibili con quelli del loro consumo; esse si contrappongono ai combustibili fossili e a quelli nucleari che sono destinati ad esaurirsi in un tempo finito. La più importante fonte rinnovabile è rappresentata dall'energia solare, la cui entità è circa 15.000 volte superiore al consumo energetico annuale di tutto il mondo. Dell'energia solare che raggiunge la superficie della Terra quasi metà viene riemessa nello spazio come radiazione infrarossa, una parte alimenta il ciclo idrologico, provoca gradienti termici dell'atmosfera e quindi i venti, e una percentuale molto piccola è assorbita dalle piante per i processi di fotosintesi. L'energia solare è dunque l'origine di quasi tutte le altre fonti energetiche, rinnovabili e convenzionali, ad eccezione di quella geotermica, nucleare e gravitazionale (maree). È evidente l'importanza delle fonti rinnovabili perché per l'uomo sono praticamente inesauribili e perché il loro uso per la produzione di energia comporta solitamente un minor impatto ambientale rispetto all'uso di combustibili fossili, soprattutto per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico. Vi sono tuttavia alcuni aspetti che ne limitano le possibilità d'impiego:

- la natura molto dispersa di queste fonti di energia (densità molto bassa per unità di superficie) comporta dimensioni notevoli dei sistemi di conversione, con impiego talora molto rilevante del territorio;
- disponibilità limitata nel tempo e discontinuità della generazione (necessità di ricorrere a sistemi di accumulo o di integrazione con altre fonti);
- sviluppo tecnologico e commerciale in alcuni casi arretrato.

3.1 Introduzione solare termico

Nel settore del Solare termico l'esempio della Germania ha fatto da traino per tutta l'Europa, anche se, dal punto di vista della potenzialità, i paesi che si affacciano sul mediterraneo, tra cui l'Italia, sarebbero di gran lunga più favoriti per questioni climatiche e di 'generosità' della fonte solare disponibile. La maturità e l'affidabilità del solare termico è tale da

collocarlo al primo posto tra le tecnologie più razionali e pulite per il riscaldamento di acqua e aria in ambito sia domestico sia, in misura crescente, produttivo. Ne è una dimostrazione l'attuale livello dei rendimenti dei pannelli solari, aumentato sensibilmente nell'ultimo decennio, rendendo varie applicazioni nel residenziale - edilizio, nel terziario e nell'agricoltura commercialmente competitive rispetto all'uso delle fonti fossili. La diffusione del solare termico in Italia soffre ancora, infatti, di alcune carenze. Tra queste, la mancanza di promotori fa sì che tuttora il prodotto sia scarsamente conosciuto tra i cittadini e anche tra i tecnici degli enti locali che potrebbero impiegarlo nelle infrastrutture pubbliche. Grande auspicio si ripone nella nuova finanziaria 2009 in cui tale impianto risulta obbligatorio in edifici di nuova costruzione e di incentivi per l'installazione in edifici già esistenti. C'è l'urgenza sul lato dei pubblici decisori di compiere un ulteriore passo cioè di introdurre in maniera sistematica, come già accade, ma solo in alcune realtà isolate, regolamenti edilizi che contemplino l'obbligo di predisporre le nuove costruzioni per l'uso di sistemi solari termici, fatto salvo che non sia recepita la direttiva.

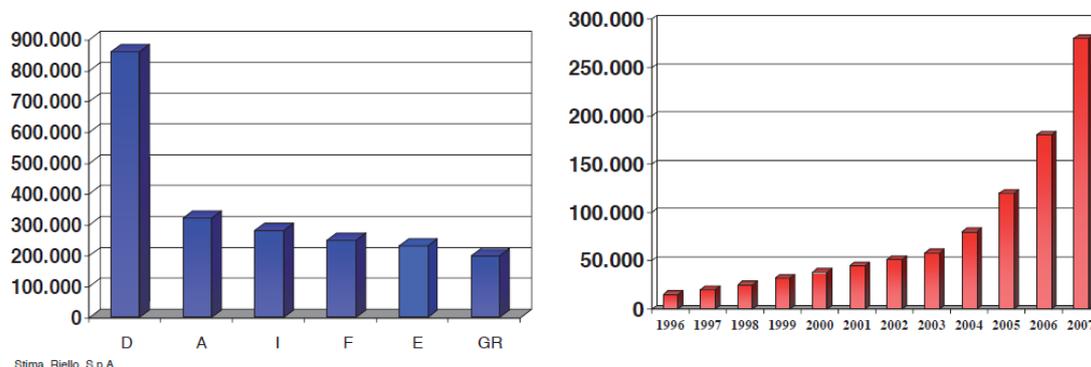


figura 5-6: il mercato EU in m² installati nel 2007 ed in Italia

Il mercato del solare in Italia è cresciuto rapidamente fino a diventare uno dei mercati più interessanti in EU, con 280.000 m² nel corso del 2007:

1. La crescita deriva principalmente dalla trasformazione di un mercato confinato inizialmente ai soli specialisti e divenuto poi una proposta integrata per il risparmio energetico.
2. Il contesto normativo (D.L. 311) che impone l'utilizzo delle rinnovabili nelle nuove costruzioni e la Finanziaria 2008 che incentiva l'utilizzo delle rinnovabili nelle abitazioni esistenti accelerano la crescita del solare in Italia.

3.1.1 Potenza di irraggiamento

Quando si dice che l'irraggiamento solare E è pari ad esempio a 1000 W/m², ci si riferisce alla capacità del sole di irradiare una certa potenza su di una superficie di 1 m². Il watt è l'unità di misura della potenza. Se la potenza si riferisce – come in questo caso- ad una superficie si chiama irraggiamento. Quando il Sole risplende con una potenza di 1000 W per un'ora produce '1 chilowattora' di energia (kWh) (energia = potenza per tempo). Da un punto di vista astronomico la quantità di energia solare disponibile sulla Terra è molto variabile. Ciò

non dipende soltanto dalla latitudine geografica ma anche dall'ora e dal periodo dell'anno di riferimento in una data località. A causa dell'inclinazione dell'asse terrestre, i giorni estivi sono più lunghi di quelli invernali ed il sole raggiunge altezze maggiori nei mesi estivi rispetto al periodo invernale.

3.1.2 Classificazione impianti solari

Gli impianti che utilizzano l'energia solare possono essere classificati in funzione del tipo di circolazione del fluido termovettore, ossia del fluido incaricato di trasferire l'energia termica captata dal collettore solare al serbatoio in cui si accumula, ad esempio l'acqua ad uso sanitario.

In base a tale criterio si distinguono impianti:

- **a circolazione naturale:**

sfruttano il principio naturale detto 'termosifonico, secondo il quale l'acqua calda tende ad andare verso l'alto per effetto della minore densità rispetto quella più fredda; quindi senza bisogno di circolatori, si riesce a fare circolare il fluido all'interno dei pannelli solari, facendolo poi confluire nel serbatoio che serve per accumulare l'acqua sanitaria. Il fluido si riscalda nel collettore e diventa più leggero, tendendo a salire verso l'alto; a questo si unisce la spinta derivante dal fluido termovettore che nel frattempo si raffredda (cedendo calore all'acqua sanitaria nel serbatoio di accumulo) e che avrà una densità più elevata, tendendo a scendere verso il basso. Perciò in questi impianti il serbatoio dell'acqua sanitaria da riscaldare si deve trovare in una posizione più alta del collettore. Possiamo fare una seconda distinzione in:

- impianti ad un solo circuito, in cui l'acqua viene fatta circolare direttamente all'interno del collettore solare;
- impianti a doppio circuito, in cui il fluido termovettore nel circuito del collettore e l'acqua sanitaria sono divisi da uno scambiatore di calore. i pannelli solari sono collegati ad una serpentina contenuta nel serbatoio e questa fa sì che che il calore catturato dal liquido circolante nei pannelli solari vada a riscaldare l'acqua all'interno del serbatoio medesimo. esistono due circuiti: uno compreso tra i pannelli solari ed il serbatoio ed uno compreso tra invece tra il serbatoio ed i rubinetti utilizzatori dell'acqua sanitaria. Il circuito compreso tra i pannelli solari ed il serbatoio è chiuso.

- **a circolazione forzata:**

un impianto a circolazione forzata è formato da un collettore solare a sé stante, connesso attraverso un circuito con un serbatoio localizzato nell'edificio. All'interno del circuito solare si trova acqua o un fluido termovettore antigelo. La pompa di circolazione del circuito solare è attivata da un regolatore differenziale di temperatura quando la temperatura all'interno del collettore è superiore alla

temperatura di riferimento impostata nel serbatoio di accumulo. Il calore viene quindi trasportato al serbatoio di accumulo e ceduto all'acqua sanitaria mediante uno scambiatore di calore. Mentre in estate l'impianto solare copre tutto il fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'acqua sanitaria, in inverno e nei giorni con scarsa insolazione serve per il preriscaldamento dell'acqua. La parte del serbatoio che contiene l'acqua calda a pronta disposizione, cioè quella da tenere sempre in temperatura, può essere riscaldata da uno scambiatore di calore legato a una caldaia. Il riscaldamento ausiliario viene comandato da un termostato quando nel serbatoio la temperatura dell'acqua nella parte a pronta disposizione scende al di sotto della temperatura nominale desiderata.

Un impianto a circolazione forzata differisce da quello a circolazione naturale per il fatto che il fluido, contenuto nel collettore solare, scorre nel circuito chiuso per effetto della spinta fornita da una pompa comandata da una centralina o termostato, attivata, a sua volta, da sonde poste sul collettore e nel serbatoio. Gli elementi costruttivi di un impianto di questo tipo sono:

- collettore/i solare/i;
- serbatoio di accumulo/scambiatore;
- caldaia;
- termostato differenziale o centralina;
- sonde di temperature;
- pompa di circolazione;
- vaso di espansione;
- scambiatore di calore;
- valvole.

L'energia necessaria per la preparazione di acqua calda nelle abitazioni private è di circa 1000 kWh per persona all'anno. Poiché la domanda di calore è pressoché costante durante tutto l'anno e quindi presente anche nel periodo estivo, il riscaldamento dell'acqua domestica è una delle applicazioni più adatte per gli impianti solari termici. In condizioni meteorologiche simili a quelle italiane, l'area di collettore necessaria varia tra 0,5 m² a persona per i climi caldi meridionali a 1 m²/persona per l'Italia settentrionale.

Nelle aree meridionali, dove non esistono significativi fenomeni di gelo, per il riscaldamento dell'acqua domestica si possono utilizzare impianti compatti ad accumulo integrato e impianti a circolazione naturale. Questi impianti sono economici e possono essere integrati nel tetto come singola unità. Gli impianti a circolazione forzata sono adatti quando i collettori hanno dimensioni maggiori e dove ci sono sistemi centralizzati per il riscaldamento. In zone con significativi fenomeni di gelo, il circuito del collettore è riempito con liquido antigelo. L'uso dell'energia solare è possibile anche per il riscaldamento ambienti utilizzando impianti combinati per il riscaldamento dell'acqua calda e degli ambienti, anche se l'irraggiamento disponibile durante la stagione di riscaldamento è molto minore che in estate. L'uso di impianti combinati è raccomandato nei casi in cui sono già stati realizzate altre misure per il risparmio energetico (per esempio adeguata coibentazione termica) e si prevede un sistema di

riscaldamento a bassa temperatura. L'area di collettore necessaria varia da 1,5 a 3 m²/kW di potenza nominale per il riscaldamento dell'edificio.

Fluido termovettore

Dove non vi è pericolo di gelo si utilizza l'acqua come liquido termovettore all'interno del circuito solare. In questo caso per evitare corrosioni bisogna aggiungere gli inibitori indicati dal produttore. Nelle zone a rischio di gelo si usa invece una miscela di acqua e di propilenglicolo atossico. La concentrazione del glicolo deve essere definita secondo le indicazioni del produttore in modo che la sicurezza antigelo ci sia fino a una temperatura che sia di 10 K inferiore alla temperatura minima media su cui si esegue il calcolo di progettazione dell'impianto di riscaldamento. Per esempio se il riscaldamento viene dimensionato per una temperatura minima media di -5 °C, la concentrazione del glicolo dovrebbe essere sufficiente a garantire l'antigelo per una temperatura di -15 °C. Gli inibitori di corrosione sopra citati sono di norma già miscelati con la maggior parte dei liquidi antigelo per impianti solari reperibili sul mercato.

3.1.3 Collettori solari

Innanzitutto è importante cosa si intende per collettore solare, distinguendolo da altri sistemi che utilizzano l'energia proveniente dal Sole; la distinzione avviene in base ai seguenti principi:

- un collettore solare trasforma la radiazione solare in calore;
- un pannello fotovoltaico trasforma l'energia proveniente dal Sole in corrente elettrica.

In generale, è possibile affermare che i collettori solari lavorano tramite una piastra selettiva che assorbe i raggi solari e che si riscalda raggiungendo temperature relativamente alte. Per evitare di disperdere in ambiente il calore che arriva dal Sole, può essere sfruttato il cosiddetto 'effetto serra'. Inoltre sono presenti materiali isolanti che impediscono (rallentano) lo scambio termico tra la superficie captante che si è riscaldata e l'ambiente esterno (quest'ultimo può trovarsi a temperature molto più basse). Una classificazione degli stessi consente di distinguere in:

- collettori solari piani 'tradizionali';
- collettori solari sottovuoto;
- collettori solari non vetrati, per il riscaldamento di piscine nel periodo estivo.

3.1.4 Collettori solari piani

I collettori solari piani sono in grado di captare le varie componenti della radiazione solare (diretta e diffusa, ovvero la luce cioè la radiazione elettromagnetica ad onde corte) e sfruttano il cosiddetto effetto serra: la copertura è cioè realizzata con materiali trasparenti rispetto alla radiazione solare in ingresso, ma opachi rispetto alla radiazione reirraggiata dall'assorbitore interno. In questo modo l'energia termica proveniente dal Sole viene 'catturata' all'interno del pannello e trasferita al fluido termovettore; le dispersioni termiche verso l'esterno vengono limitate attraverso l'inserimento di materiale isolante, nelle zone laterali e posteriore.

L'elemento principale è costituito dall'assorbitore o piastra captante, che ha la funzione di assorbire la radiazione solare incidente e di trasformarla in calore; in generale, viene quindi realizzato con l'obiettivo di riuscire a trasformare il più possibile la radiazione solare in energia termica. Tale piastra trasferisce il calore assorbito ad un sistema di canali contenenti un fluido termovettore che assorbe il calore e lo trasferisce attraverso uno scambiatore di calore ad un secondo fluido contenuto in un serbatoio di accumulo (sistema a doppio circuito). Dopo avere ceduto il calore, il fluido termovettore raffreddato ritorna al collettore attraverso il circuito idraulico di ritorno, mentre l'acqua ad uso sanitario, una volta riscaldata, si dispone negli strati più alti del serbatoio di accumulo. L'acqua si stratifica nel serbatoio secondo la sua densità e temperatura: l'acqua più calda si accumula nella parte superiore del serbatoio (da dove viene richiamata quando vengono aperti i rubinetti dall'utenza finale), mentre quella più fredda si trova sul fondo del serbatoio (dove è previsto l'ingresso dell'acqua di rete). Nella maggior parte dei sistemi solari termici, il fluido termovettore è costituito da una miscela antigelo di acqua e glicole che viene fatta circolare in un sistema chiuso. Tale sistema, nel quale il circuito solare è separato dal circuito dell'acqua potabile, viene denominato sistema a circuito chiuso. La produttività di impianto solare di piccola taglia (la superficie captante richiesta, in Italia, secondo la latitudine del sito, è compresa tra 0,50 e 1,2 m² per persona, mentre per il volume del serbatoio di accumulo si considerano circa 70 l per m² di superficie captante), consente di ottenere mediamente una copertura del fabbisogno annuale di circa il 70% (percentuale di energia termica fornita dal sole rispetto al totale richiesto per il riscaldamento dell'acqua per usi sanitari). Il restante 30% deve essere fornito tramite un impianto di riscaldamento ausiliario di tipo tradizionale o ad energia alternativa quale la caldaia a biomassa. Poiché l'apporto di energia è proporzionale alla temperatura alla quale si desidera riscaldare l'acqua, più bassa è tale temperatura (ad esempio 45°C) maggiore è la copertura solare e di conseguenza meno intensivo è l'impiego della caldaia.

Il principale componente di un collettore piano è la piastra captante che è costituita generalmente da una lastra metallica con buona conducibilità termica (ad es. in rame e alluminio, in un'unica lastra o a lamiere saldate insieme), che viene trattata con apposite vernici di colore nero e sulla quale vengono saldati, inseriti o aggraffati dei tubi, generalmente di rame, nei quali scorre il fluido termovettore. Per massimizzare la resa termica del collettore è necessario che la piastra captante sia caratterizzata da un'elevata assorbenza e da una bassa remissività termica. Queste proprietà vengono raggiunte da un trattamento selettivo; a differenza della vernice nera, il trattamento selettivo si presenta come un rivestimento a strati che da un lato favorisce la conversione della radiazione ad onde corte in calore e, dall'altro, impedisce il rilascio di calore verso l'esterno.

Naturalmente, se la piastra captante è realizzata in rame e la connessione con i tubi eseguita al meglio, la trasmissione del calore tra la piastra ed i tubi nei quali scorre il fluido termovettore è massima.

Riducendo la massa di acqua da riscaldare si ottiene una rapida reazione del sistema alle continue variazioni dell'irraggiamento e, di conseguenza, un miglioramento del rendimento

energetico del sistema. Le piastre con canalizzazione sono caratterizzate da una quantità di fluido per unità di superficie (0,4-0,6 l di fluido termovettore per m² di superficie) minore rispetto a quelle a 'libera circolazione del fluido ' (1-2 l/m²).

3.1.5 L'isolamento termico

Per ridurre le perdite di calore verso l'esterno per conduzione termica le pareti della scatola di contenimento sono interamente coibentate. Il collettore può raggiungere anche temperature di 150-200 °C (ad es. in caso di stagnazione); si usano:

- fibre minerali
- lastre in poliuretano espanso rigido senza CFC.

La piastra captante e l'isolamento termico vengono alloggiati in una scatola di contenimento e la copertura di vetro protegge nella parte superiore in modo da consentire la trasmissione della luce e agevola il cosiddetto effetto serra. Una buona copertura deve avere le seguenti caratteristiche:

- elevata trasparenza alla luce durante tutto il ciclo di vita del collettore
- basso coefficiente di riflessione
- resistenza ai carichi meccanici (grandine, rami spezzati, ecc.)
- non deve favorire le dispersioni termiche per convezione dovute alla ventilazione esterna
- deve proteggere il collettore dall'umidità.

3.1.6 I pozzetti per i sensori

Tramite delle sonde rilevo la temperatura del fluido termovettore, posizionando il sensore in corrispondenza della mandata e, successivamente, collegato al sistema di regolazione.

3.1.7 Parametri caratteristici

I parametri fisici che bisogna considerare nella scelta di un collettore piano sono:

- **rendimento ottico (η_0):** rendimento che si ottiene nel momento in cui la temperatura media del fluido nel collettore è uguale alla temperatura ambiente esterna (situazione nella quale non si verificano praticamente dispersioni termiche). E' calcolato tenendo conto del fatto che una parte dell'irraggiamento che investe il collettore solare non viene sfruttata, per effetto della riflessione del vetro del collettore (di tipo ottico in funzione del grado di trasparenza della copertura τ trasmittanza della copertura vetrata) e dell'assorbimento (di tipo termico dato dalla capacità di assorbimento della piastra α assorbenza della piastra). Considera inoltre le perdite nel processo di trasmissione del calore al fluido termovettore che dipendono dalla differenza di temperatura esistente tra la piastra captante e l'esterno, dall'irraggiamento e dalle caratteristiche costruttive del collettore.

Le perdite globali di calore complessive che si manifestano nel collettore per conduzione, convezione ed irraggiamento sono esprimibili mediante il coefficiente di perdita globale K in [W/m² °C].

$$\eta_0 = \tau \times \alpha$$

3.1.8 L'efficienza istantanea di un collettore piano

$$\eta = \frac{Q_N}{E};$$

rapporto tra il calore utile ceduto al fluido termovettore nell'unità di tempo e la radiazione solare incidente nell'unità di tempo.

L'energia termica ceduta al fluido termovettore nell'unità di tempo è calcolata come differenza tra la radiazione solare captata dalla piastra convertita in calore, e le perdite di calore per convezione, conduzione e irraggiamento:

$$Q_N = E_C - Q_P$$

radiazione solare captata piastra in dt – energia termica dissipata in dt per i fenomeni di perdite del calore:

$$E_C = E \times \tau \times \alpha \quad [4]$$

$$Q_P = K \times \Delta T, \quad [5]$$

dove:

ΔT = temp. media piastra – temp. ambiente = $T_P - T_A$;

sostituisco 4 e 5 nella 3, si ottiene:

$$\eta = (E \times \tau \times \alpha - K \times \Delta T) / E$$

$$\eta = \eta_0 - (K \times \Delta T / E)$$

Un ottimo generatore solare termico generalmente ha un efficienza ottica $\eta_0 > 0,8$ ed un valore $K < 4,5$. Grazie alle condizioni climatiche particolarmente favorevoli in molte zone d'Italia, comunque, anche dispositivi con K elevati forniscono buone prestazioni.

L'efficienza globale media annuale di un sistema solare con collettori piani, per il dimensionamento di massima si assume pari al 50-55%. Questo significa che l'energia utile ricavabile alle latitudini italiane, dove si può assumere in prima approssimazione un valore della radiazione solare media annuale di 1600 kWh/ m², è di circa 800-880 kWh/m² anno. Per quanto riguarda il costo di un impianto solare con collettori piani si può fare riferimento ai seguenti valori:

- costo del collettore (per m²): 200-350 €/ m² (escluso montaggio, fissaggio ed IVA)
- costi totali del sistema solare (per m²): 550-800 €/ m² (IVA inclusa)
- costi di un impianto solare per una famiglia di 3-4 persone: 2000-3000 €.

Vantaggi di un collettore solare piano:

- è affidabile, richiede scarsa manutenzione, rapporto costo/prestazione è buono; più economico di un collettore sottovuoto ed offre diverse possibilità di montaggio.

Limiti :

- non adatto alla produzione di calore ad elevate temperature presenta una minore efficienza rispetto ai collettori sottovuoto in quanto il valore di K è più alto richiede un sistema di supporto per il montaggio su tetti piani e uno spazio maggiore sul tetto rispetto ai collettori sottovuoto.

Oppure possiamo definire l'efficienza istantanea di un collettore solare il rapporto tra l'energia assorbita dal fluido termovettore e l'energia incidente sulla sua superficie.

$$\eta = \frac{\text{energia utile concentrata}}{\text{energia solare incidente}} = \frac{Q_U}{G * S} = \frac{m c_p (T_U - T_I)}{G * S}$$

dove:

- Q_U è l'energia trasferita dal collettore al fluido termovettore;
- S è superficie di apertura del collettore;
- G è la radiazione solare incidente per unità di superficie;
- m è la portata del fluido termovettore;
- c_p è il calore specifico del fluido termovettore;
- T_i è la temperatura d'ingresso del fluido in ingresso nel collettore;
- T_u è la temperatura d'uscita del fluido termovettore.

La figura che segue mostra le diverse efficienze dei vari tipi di collettori in funzione della differenza di temperatura dovuta all'energia solare incidente utile:

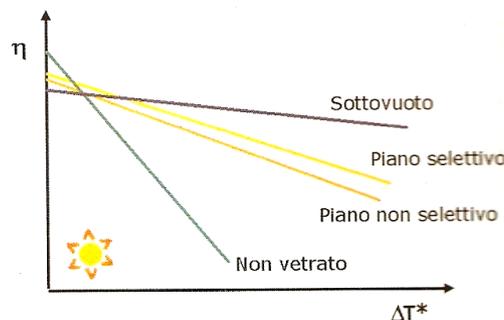


figura 7: efficienze dei vari tipi di collettori in funzione della differenza di temperatura dovuta all'energia solare incidente utile

3.1.9 I collettori sottovuoto

Collettori a tubi evacuati

Per ridurre le dispersioni di calore tipiche di un collettore solare e migliorarne l'efficienza, nei collettori viene praticato il 'vuoto' tra la copertura vetrata e la piastra captante. I collettori a tubi evacuati sono costituiti da una serie di tubi in vetro sottovuoto nei quali è alloggiata la piastra captante. Allo scopo di eliminare completamente le dispersioni termiche per

convezione, nei tubi viene praticato il vuoto fino a raggiungere il vuoto ad una pressione inferiore ai 10^{-2} bar. Un'evacuazione più spinta permette di eliminare le perdite per dispersione termica. Le perdite per irraggiamento, come nel caso dei collettori piani, possono essere ridotte intervenendo sulla piastra captante con dei trattamenti selettivi che contribuiscono a limitare il valore di remissività. Anche in presenza di una temperatura di piastra captante superiore ai 120 °C, la superficie esterna del tubo di vetro risulta fredda al tatto.

3.1.10 Collettori a tubi evacuati con circolazione diretta del fluido termovettore

Questa tipologia costruttiva prevede due diverse soluzioni. Nel primo caso, il sistema è costituito da due tubi coassiali entro cui scorre il fluido termovettore che, in un primo momento, viene fatto passare nel cilindro più interno quindi, giunto alla base del bulbo di vetro, inverte il suo percorso e circola nell'intercapedine tra i due tubi coassiali. La seconda soluzione prevede, invece, l'esistenza di un tubicino che percorre longitudinalmente il cilindro metallico che funge da piastra captante, seguendo un percorso ad 'u'. Tali collettori possono essere orientati a sud con inclinazione ottimale secondo la latitudine del sito; inoltre, in virtù della copertura presentata dalla superficie captante, possono essere disposti anche orizzontalmente.

3.1.11 Collettori sottovuoto a tubi di calore

In questi tipi di dispositivi lo scambio di calore avviene mediante il passaggio di fase: il fluido riscaldato per irraggiamento dapprima vaporizza, quindi condensa nuovamente in corrispondenza di un condensatore dove rilascia l'energia termica precedentemente assorbita. Il tubo evacuato ospita una lamina piana, disposta longitudinalmente e trattata in modo selettivo, che funge da piastra captante. Su tale lamina metallica a sua volta è inserito un tubicino in depressione, che riceve calore dalla piastra captante per conduzione. Il tubo di calore è chiuso e contiene acqua o alcool che, in condizioni di depressione, evaporano a circa 25 °C. Il vapore sale in alto fino alla testa del collettore dove condensa cedendo l'energia termica ad un secondo fluido esterno. A questo punto, si genera nuovamente un film liquido che torna per gravità nella zona di evaporazione. Per funzionare in modo adeguato, i tubi devono essere installati con inclinazione minima di 25 °C. I collettori di questo tipo vengono commercializzati in due versioni. con scambio di calore a secco o con scambio di calore per immersione. Nel primo caso il fluido esterno, che riceve dal vapore l'energia termica rilasciata durante il processo di condensazione, circola in un canale separato che circonda completamente i condensatori disposti in serie: il flusso termico, pertanto, avviene attraverso le pareti metalliche di questo canale-scambiatore. Questa soluzione costruttiva consente di poter sostituire agevolmente uno dei tubi del collettore in caso di rottura, senza dover svuotare il circuito solare. Nella seconda ipotesi, ovvero con scambio di calore per immissione, i condensatori si trovano immersi direttamente nel fluido del circuito solare. In caso di rottura di uno dei tubi del collettore, è necessario svuotare almeno il condotto di raccolta che si trova in testa ai tubi sottovuoto.

3.1.12 Alcuni valori numerici di valori di riferimento

I collettori a tubi evacuati hanno un'efficienza ottica lievemente inferiore rispetto ai collettori piani in ragione della forma discontinua della piastra captante ($\eta_0 = 0,6-0,8$). Grazie al migliore isolamento termico il valore di $K < 3$ e di conseguenza l'efficienza media annua è maggiore rispetto al collettore piano. Inoltre mantiene un'elevata efficienza anche in presenza di elevate differenze di temperature tra la piastra captante e l'ambiente circostante, anche in presenza di un basso valore di irraggiamento. Molto importante ai fini del nostro studio è il fatto che i collettori a tubi sottovuoto ben si prestano a riscaldare il fluido ad elevate temperature, ed è quindi utilizzabile anche come impianto di riscaldamento ed il condizionamento degli ambienti, e per la generazione di vapore.

- costi specifici del collettore: 600-900 €/ m²
- costi specifici del sistema: 1000-1300 €/ m²

3.1.13 Intervento di risparmio energetico

Il dimensionamento di un sistema solare non può basarsi esclusivamente sull'analisi dei consumi attuali o previsti in base ai consumi storici dell'abitazione, ma deve essere affiancata da un'analisi della possibilità di ridurre i consumi al minimo indispensabile. Non ha senso, infatti, utilizzare una fonte di energia pulita come quella solare, se precedentemente non si è cercato in ogni modo di ridurre la richiesta di energia, eliminando dispersioni e sprechi.

Il risparmio di energia rappresenta quindi un obiettivo di primaria importanza, conseguibile sostanzialmente in due modi:

- agendo a livello della domanda, ovvero incentivando gli utenti a modificare le proprie abitudini di consumo (in questo caso si parla più propriamente di sacrificio energetico);
- agendo a livello dell'offerta, ovvero promuovendo la sostituzione di apparecchi comuni con prodotti ad elevata efficienza che, a parità di prestazioni, richiedano un consumo energetico inferiore.

D'altra parte, la realizzazione di un intervento di risparmio energetico comporta quasi sempre un investimento economico, la cui convenienza deve essere preventivamente valutata a fronte del valore di risparmio energetico ottenibile. Si tratta, in sostanza di quando costa risparmiare energia. La prima via che si presenta al progettista per mettere un freno ai consumi è quella di agire a livello dell'offerta, impiegando dispositivi di risparmio energetico. Nel caso dell'ACS, si possono adottare ad esempio: il riduttore di portata, che limita il flusso al rubinetto, ed il miscelatore aria-acqua, che aggiunge al flusso d'acqua uno d'aria dando infine un'impressione di un getto notevole, sebbene la quantità d'acqua in uscita diminuisca.

3.1.14 Influenza dell'orientamento

A seguito dell'angolo di incidenza dei raggi solari, è possibile massimizzare il valore dell'energia captata nei diversi giorni dell'anno, solo se la superficie ricevente è inclinata con

una certa angolazione con il piano orizzontale, il cui valore dipende dalla latitudine. L'angolo di inclinazione che consente la massima resa nei mesi invernali è maggiore rispetto all'angolo di inclinazione ottimale per i mesi estivi, a causa dei più bassi valori dell'altezza del sole nel periodo invernale. Per ovviare a questo problema di seguito si riportano i dati di radiazione calcolati per superficie orizzontale ed inclinata secondo un calcolo effettuato da ENEA e un altro secondo la UNI 8477:

3.2 Dimensionamento di un impianto solare per la produzione di ACS

Generalmente, il dimensionamento di un sistema solare termico per la produzione di acqua calda ad uso domestico ha l'obiettivo di coprire il 100% di fabbisogno nei mesi più caldi (esempio da giugno a settembre). In tale periodo, la caldaia tradizionale di integrazione potrebbe (salvo aumento del carico ed imprevisti) rimanere spenta. In questo caso, al risparmio energetico, ambientale ed economico, va aggiunto anche quello relativo al prolungamento della vita della caldaia. Nei mesi più freddi, il sistema solare offre la sua azione per il pre-riscaldamento dell'acqua, che viene poi portata alla temperatura d'utenza dal sistema di riscaldamento tradizionale.

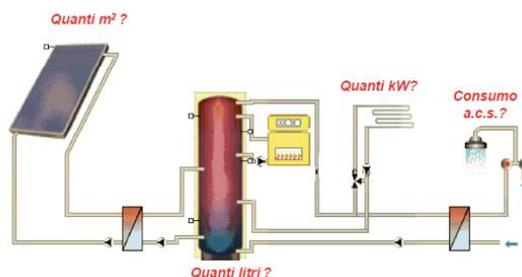


figura 8: schema di funzionamento e collegamento impianto termico collegato alla caldaia

3.2.1 Fattore di copertura solare

Il fattore di copertura solare è definito dal rapporto fra l'energia utile ottenuta grazie all'impianto solare e la richiesta totale di energia termica per la produzione di ACS in un certo periodo di tempo (tipicamente un anno):

$$FS = \left[\frac{Q_{us}}{Q_{us} + Q_{tr}} \right] \times 100$$

con:

FS = fattore di copertura solare[%];

Q_{us} = energia utile da fonte solare [kWh];

Q_{tr} = energia termica utile da fonte convenzionale integrativa [kWh].

3.2.2 Efficienza del sistema

L'efficienza del sistema rappresenta la quantità di energia fornita all'utenza rispetto all'energia incidente sulla superficie captante, entrambe calcolate nel medesimo periodo di tempo, ad esempio un anno:

$$\eta_{sis} = \left[\frac{Q_{us}}{E + A} \right] \times 100$$

con:

η_{sis} = efficienza complessiva del sistema [%];

E = radiazione solare annua [kWh/m²a];

A = superficie captante [m²];

Q_{us} = energia termica fornita all'utenza da fonte solare [kWh/a].

3.2.3 Analisi del fabbisogno di acqua calda sanitaria

Il fabbisogno giornaliero di acqua calda sanitaria è espresso da:

$$M = p \cdot c \text{ [l/giorno]}$$

dove:

- p è il numero di persone che abitano l'edificio;
- c il fabbisogno di acqua calda.

3.2.4 Dimensionamento di massima della superficie captante

Sulla base dell'esperienza impiantistica degli ultimi decenni, un valore ottimale per il fattore di copertura solare (compreso tra il 60-70%) può essere ottenuto, generalmente, a partire dalle seguenti condizioni:

- fabbisogno medio di ACS, C_u = 40-70 litri a persona giorno (45°);
- posizionamento che non si discosti molto da quello ottimale per le latitudini italiane (latitudine del luogo +10°);
- ombreggiamento assente o ridotto al minimo.

3.2.5 Estensione della superficie captante:

- 0,7 a 1,2 m² a persona, in caso di collettore piano;
- 0,5 a 0,8 m² a persona, in caso di collettore sottovuoto.

3.2.6 Calcolo del fabbisogno di acqua calda sanitaria

Il consumo di acqua calda sanitaria nel nucleo abitativo C_u di cui si vuole progettare il sistema rappresenta un elemento chiave per la progettazione dell'impianto. Se non dovessero disponibile un valore di misurazione affidabile, tale valore deve essere calcolato in maniera il più possibile precisa. Durante la fase di osservazione delle abitudini delle utenze, è importante individuare eventuali possibilità per la riduzione dei consumi (come, ad esempio, riduttori di portata o miscelatori aria-acqua). Dando per scontata una razionalizzazione dell'energia, si pensi anche che un consumo più basso corrisponde un impianto più piccolo e, quindi meno costoso.

3.2.7 Analisi del fabbisogno di acqua calda

Negli edifici residenziali il fabbisogno termico per la produzione di acqua calda rimane costante nel corso dell'anno. Un'indicazione sul fabbisogno di acqua calda è data dal numero di persone che abitano l'edificio. Solitamente il consumo giornaliero pro capite di acqua calda a 45 °C viene stimato intorno a queste cifre:

- comfort basso 35 l/(persona/giorno);
- comfort medio 50 l/(persona/giorno);
- comfort alto 75 l/(persona/giorno).

Nel caso si vogliano collegare all'impianto solare anche la lavatrice e la lavastoviglie, il fabbisogno deve essere aumentato di:

- lavatrice 20 l/giorno (1 lavaggio al giorno);
- lavastoviglie 20 l/giorno (1 lavaggio al giorno).

3.2.8 Dimensionamento della superficie dei collettori

Per una situazione con orientamento ideale (sud, inclinazione 30°) si utilizzano i valori di riferimento di seguito riportati per dimensionare la superficie del collettore. Questa viene quindi calcolata in relazione al fabbisogno giornaliero di acqua calda.

Zone Italia	Valori di riferimento per il dimensionamento
Nord	1,2 m ² / (50 l/giorno)
Centro	1,0 m ² / (50 l/giorno)
Sud	0,8 m ² / (50 l/giorno)

Questi valori di dimensionamento permettono di coprire completamente il fabbisogno durante i mesi estivi, cioè in estate tutta l'acqua calda sanitaria viene riscaldata dall'impianto solare. Calcolato su tutto l'anno, il risparmio energetico ottenuto è di circa 50-80%. I valori in tabella devono essere ridotti del 30 % nel caso in cui si usino collettori a tubi sottovuoto:

- I valori riportati sono valori indicativi. La superficie reale dei collettori è da calcolare effettivamente sulle dimensioni dei moduli esistenti. Differenze di ±20 % possono essere considerate non problematiche.
- I valori di riferimento valgono per collettori piani. Per collettori a tubo sottovuoto sono sufficienti per i 2/3 della superficie calcolata. Orientamenti diversi da quello ideale riducono la prestazione dell'impianto molto meno di quanto normalmente si pensi. Nella maggior parte dei casi questo può essere compensato da un minimo aumento della superficie dei collettori. Una struttura di supporto per ottenere un migliore orientamento del collettore è, ove possibile, da evitare per motivi estetici. Nella tabella 6.2 sono indicati i valori di correzione per i diversi orientamenti. La superficie del collettore calcolata come descritto finora deve essere quindi divisa per il fattore di correzione.

orientamento Sud: 0° Est/Ovest: 90°	angolo di inclinazione						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	0,89	0,97	1	0,99	0,93	0,83	0,89
15	0,89	0,96	1	0,98	0,93	0,83	0,89
30	0,89	0,96	0,99	0,97	0,92	0,82	0,70
45	0,89	0,94	0,97	0,95	0,9	0,81	0,70
60	0,89	0,93	0,94	0,92	0,87	0,79	0,89
75	0,89	0,91	0,91	0,88	0,83	0,76	0,86
90	0,89	0,88	0,87	0,83	0,78	0,71	0,82

figura 9: fattori di correzione per l'orientamento dei collettori (questi valori valgono solo per impianti solari impiegati per il riscaldamento dell'acqua sanitaria)

3.2.9 Dimensionamento del serbatoio

Il serbatoio serve a equilibrare la differenza temporale tra la presenza dell'irraggiamento e l'utilizzo dell'acqua calda.

Serbatoi dall'ampio volume permettono di superare periodi anche lunghi di brutto tempo, tuttavia causano anche maggiori dispersioni di calore.

Il volume del serbatoio corrisponderà circa a 50 - 70 l/(m² superficie di collettore piano). Negli impianti con riscaldamento ausiliare integrato nel serbatoio (per esempio un secondo scambiatore di calore oppure una serpentina elettrica, vedi anche fig. 3.3 e 3.4) il volume in temperatura, cioè la parte di serbatoio che viene mantenuta sempre alla temperatura desiderata per l'acqua calda, viene sempre calcolato secondo il fabbisogno giornaliero di acqua calda. Dovrebbe aggirarsi sui 20 l/persona.

3.2.10 Scambiatori di calore del circuito solare

Negli impianti semplici, come di norma sono quelli delle case unifamiliari, si preferisce solitamente impiegare all'interno del serbatoio scambiatori di calore a tubi lisci o corrugati. Negli impianti più grandi si utilizzano scambiatori di calore esterni a piastre o a fasci di tubi.

La superficie dello scambiatore di calore dovrebbe essere circa 0,4 m²/(m² superficie del collettore). Non bisogna assolutamente impiegare materiali zincati nel circuito solare se si usa una miscela di acqua e glicolo.

Il diametro dei tubi di rame viene dimensionato in relazione al flusso scelto, come si può evincere dai dati della tabella :

flusso [l/h]	diámetro esterno x spessore [mm]
< 240	16 x 1
240 - 410	18 x 1
410 - 570	22 x 1
570 - 880	28 x 1,5
880 - 1450	35 x 1,5

Sia i tubi flessibili in rame, sia i tubi corrugati in acciaio inox sono reperibili con il nome di 'Lifeline' già coibentati e a coppie con il cavo per il sensore della temperatura del collettore già montato. La perdita di pressione è maggiore con i tubi corrugati inox rispetto a tubi dalle pareti interne lisce, quindi la sezione deve essere maggiore, come indicato nei dati forniti dal produttore.

3.2.11 Calcolo della perdita di pressione e scelta della pompa

La pompa di circolazione del circuito solare deve essere dimensionata con molta cura. Se la potenza della pompa è troppo bassa si possono generare grandi escursioni termiche all'interno del circuito del collettore, causando quindi un rendimento troppo basso del collettore. Una pompa troppo potente causa invece un consumo energetico inutilmente grande.

Nei piccoli impianti, fino a 12 m² di superficie dei collettori e fino a 50 metri di tubature, possono essere impiegate piccole pompe da riscaldamento a tre posizioni (per esempio Grundfos UPS 25-40). Negli impianti più grandi è inevitabile procedere al calcolo della perdita di pressione e quindi alla scelta di una pompa adeguata. In questo caso, infatti, i valori di perdita di pressione sono da calcolare per le tubature e per tutte le componenti (collettori, fluido termovettore, raccordi, valvola di non ritorno, valvole ecc.). I dati sono indicati nella documentazione tecnica delle diverse componenti e nelle tabelle e diagrammi riportati nei manuali per installatori.

I diagrammi della perdita di pressione per le miscele di acqua e glicolo sono messi a disposizione dai produttori di glicolo.

3.2.12 Pressione d'esercizio, vaso d'espansione e valvola di sicurezza

Le seguenti raccomandazioni devono assolutamente essere seguite, perché l'errata impostazione della pressione di esercizio e un calcolo impreciso delle dimensioni del vaso di espansione sono una frequente fonte di malfunzionamento negli impianti solari. Un dimensionamento poco accurato può portare in estate, in conseguenza a una fermata dell'impianto per surriscaldamento, alla perdita di fluido termovettore, impedendo all'impianto di rientrare automaticamente in funzione.

La pressione di esercizio deve essere determinata come segue:

- la pressione iniziale p_I è la pressione (differenza di pressione rispetto all'ambiente) all'interno del circuito solare che deve essere raggiunta durante il riempimento del circuito a freddo. È la stessa pressione che si raggiunge anche di notte quando la pompa di circolazione del circuito solare non è in funzione. Dipende dal dislivello tra il punto più alto del circuito solare e la sede del vaso di espansione. Se la differenza di quota è per esempio di 10 m, ciò corrisponde a 10 m di colonna d'acqua = 1 bar. La pressione iniziale dovrebbe quindi, con un supplemento di sicurezza di 0,5 bar, raggiungere almeno il valore $p_I = 1,5$ bar. Il valore consigliato è: $p_I = 2$ bar fino a 15 m di dislivello.
- la pressione finale p_F è la pressione teorica (differenza rispetto alla pressione dell'ambiente) all'interno del circuito solare, che non viene mai superata se l'esecuzione è corretta. Si calcola sulla tenuta a pressione delle componenti (per esempio collettori), ma non dovrebbe mai superare 5,5 bar. Il valore consigliato è: $p_F = 5$ bar, se le componenti lo permettono;
- la pressione predefinita nel vaso d'espansione p_{VE} dovrebbe essere di circa 0,3 – 0,5 bar al di sotto della pressione iniziale p_I , in modo che anche a freddo la membrana del

vaso d'espansione sia leggermente in tensione. Il vaso d'espansione può essere acquistato con questa pressione a riposo oppure si può impostare il valore desiderato direttamente sulla valvola. A questo scopo si può utilizzare un semplice manometro per pneumatici. Valore consigliato: $p_{VE} = 1,5$ bar;

- la pressione d'intervento della valvola di sicurezza p_{VS} (differenza rispetto alla pressione dell'ambiente) dovrebbe essere almeno 0,5 bar al di sopra della pressione finale, in modo che la valvola di sicurezza, se l'esecuzione è corretta, non entri mai in gioco. Valore consigliato: $p_{VS} = 6$ bar, se le componenti lo permettono;
- inoltre il fattore di pressione $D_f = (p_F - p_I) / (p_F + 1)$ del vaso d'espansione non deve essere maggiore di 0,5 perché altrimenti la membrana al suo interno si logora inutilmente.

Il vaso di espansione serve a recepire l'aumento di volume all'aumento della temperatura del fluido termovettore e in caso di stagnazione dell'impianto serve a recepire tutto il fluido contenuto all'interno del collettore.

Il contenuto di fluido V_{FI} all'interno del circuito solare si calcola in questo modo:

contenuto di fluido del circuito $V_{FI} =$ contenuto di fluido nel collettore VC

+ contenuto di fluido nelle tubature

+ contenuto di fluido nello scambiatore di calore

+ contenuto di fluido in altre componenti.

La dilatazione del volume del fluido viene così calcolata:

$$DV = e \times VFI$$

col coefficiente di dilatazione $e = 0,045$ per l'acqua, $e = 0,07$ per miscela acquaglicolo. Il volume utile del vaso d'espansione viene calcolato con una ulteriore sicurezza del 10%:

$$VU = (DV + VC) \times 1,1$$

Il volume nominale, cioè il volume che viene riportato nei cataloghi dei prodotti deve essere calcolato utilizzando le pressioni determinate in precedenza.

$$VN = VU \times (p_F + 1) / (p_F - p_I)$$

Il vaso d'espansione deve avere almeno questo volume nominale. La Tab. riporta i valori di riferimento per la scelta del vaso d'espansione:

superficie collettore [m ²]	pressione iniziale	
	$p_i = 1,5$ bar	$p_i = 2,5$ bar
5	12 l	18 l
7,5	18 l	25 l
10	25 l	35 l
15	35 l	50 l

tabella 20 : valori di riferimento per la scelta del vaso d'espansione

3.2.13 Normativa di riferimento per il solare termico

- Legge 10/91 sul risparmio energetico e il decreto di attuazione DPR 412/93
- Legge 46/90 sulla sicurezza degli impianti negli edifici civili e il DPR 447/91
- Leggi e normative in materia di vincoli storico-artistico e paesaggistico o ambientale e dei regolamenti edilizi comunali
- UNI 8211:1981 Impianti di riscaldamento ad energia solare. Terminologia, funzioni, requisiti e parametri per l'integrazione negli edifici.
- UNI 8477-1: 1983: Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta.
- UNI 8477-2: 1985: Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione degli apporti ottenibili mediante sistemi attivi e passivi.
- UNI EN ISO 9488:2001: Energia solare. Vocabolario.
- UNI 9711:1991:Impianti termici utilizzando energia solare. Dati per l'offerta, ordinazione e collaudo
- UNI ENV 12977-3: 2004: Impianti solari termici e loro componenti

3.3 Dimensionamento impianto solare termico

Il dimensionamento dell'impianto da installare nella casa è stato effettuato su un foglio di calcolo in cui si è analizzato la producibilità annua di energia da fonte solare, idonea a coprire i fabbisogni di energia termica per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento.

Dai ragionamenti che seguono si nota che l'impianto non è dimensionato per coprire il 100% dei fabbisogni annuali, ma viene presa in considerazione l'installazione di una caldaia a pellets che integra gli apporti di energia qualora il carico termico risulta maggiore di quello offerto dai pannelli solari termici.

Dapprima si è fatto un dimensionamento di massima dell'impianto partendo da un'analisi mensile dei fabbisogni e conseguentemente degli apporti solari; successivamente si è ricavata una analisi media dei consumi.

3.3.1 Determinazione del fabbisogno di ACS

Nel dimensionamento di massima, è indispensabile definire il livello di comfort da attribuire al caso in questione per ricavare il fabbisogno di acqua calda giornaliero:

livello di comfort	l/g
basso	35
medio	50
elevato	75
incremento lavatrice	20
incremento lavastoviglie	20

tabella 21: determinazione livello di comfort

Si è scelto un livello medio, per cui risulta che il fabbisogno di ACS è di 50 l/giorno persona; se nell'abitazione in questione vi abiteranno 4 persone, il fabbisogno giornaliero di acqua sarà:

$$V_{ACS} = \text{fabbisogno ACS (abitazione)} = 50 \text{ l/g} \cdot \text{persona} \cdot 4 \text{ persona} = 200 \text{ l/g} = 0,2 \text{ m}^3/\text{g}$$

Adesso passo alla determinazione del fabbisogno termico che occorre per riscaldare l'acqua ad una temperatura di 45 °C; considerando quanto detto su, si è considerata una differenza di temperatura tra di 37 °C tra la temperatura di mandata e di apporto relativa all'acqua di rete fissata a 8 °C:

$$Q_{ACS} = (c_p \times V_{ACS} \times \Delta T) \times t = ((4,12(\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})) \times 200(\text{l}/\text{pers} \cdot \text{g}) \times 37(^{\circ}\text{K}))/3600) \times t$$

	fabbisogno termico mese (kWh/mese)	fabbisogno termico per riscaldamento	fabbisogno ACS + RISC
gennaio	262,535	584,221	846,756
febbraio	237,128	461,501	698,630
Marzo	262,535	384,185	646,721
aprile	254,066	224,152	478,219
maggio	212,866	0	212,866
giugno	206	0	206
luglio	212,866	0	212,866
agosto	212,866	0	212,866
settembre	206	0	206
ottobre	262,535	72,456	334,992
novembre	254,066	267,081	521,147
dicembre	262,535	492,849	755,384
totale anno	2846	2486,448	5332,452

tabella
22:
determ
inazion

e fabbisogno termico annuo per ACS e riscaldamento

Da cui risulta un fabbisogno annuale di 2846 kWh/anno di energia termica per ACS. In seguito, si passa alla determinazione dell'irraggiamento solare nella località in questione; i dati che mi servono sono elencati qui di seguito:

dati ambientali	
latitudine	37°57'
superficie tetto utile m ²	78,4
ombreggiamenti	nessuno
Radiazione annua kWh/m ²	1771,15
numero persone	4
inclinazione	30
azimuth	0

tabella 23: dati ambientali

	sud-30°	radiazione mensile
Gennaio	3,2	99,2
Febbraio	4,11	115,08
Marzo	4,81	149,11
Aprile	5,48	164,4
Maggio	6,14	190,34
Giugno	6,35	190,5
Luglio	6,48	200,88
Agosto	5,96	184,76
Settembre	5,09	152,7
Ottobre	4,35	134,85
Novembre	3,18	95,4
Dicembre	3,03	93,93

tabella 24: radiazione mensile sul piano dei moduli

Da notare, come la disposizione del tetto a falda, l'inclinazione e l'orientamento risultano ottimali per il sito in questione, in quanto tutti insieme permettono di massimizzare il massimo apporto di energia solare per l'impianto in tutto l'anno. Questo si tradurrà, oltre che per il massimo di energia termica ottenibile nella località in questione, anche in un risparmio

in termini di superficie netta installabile e quindi di un minore onere di acquisto dei pannelli, nonché in una massimizzazione del risparmio di energia. Adesso si passa alla determinazione delle caratteristiche specifiche-tecniche dei moduli scelti per l'installazione. Si è scelto di installare un pannello a tubi sottovuoto che hanno le seguenti caratteristiche tecniche:

a1	a2	η_0	portata consigliata	peso	n° tubi collettore	volume fluido collettore	capacità acqua collettore
2,103	0,0107	0,78	85-170	61,65	16	2,64	2,64
su p. lorda	sup. assorbente	sup. apertura	diametri	max pressione esercizio		max T. stagnazione	costo singolo pannello
3,04	1,31	1,51		13	bar	246	1.190,00

tabella 25: caratteristiche tecniche pannello a tubi sottovuoto

Ricavo il rendimento del collettore, in funzione dell'irraggiamento globale, e della differenza di temperatura tra quella del fluido termovettore t_m , e quella della temperatura ambiente t_{amb} :

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{\Delta t}{\text{irraggiamento, globale}} - a_2 \cdot \frac{\Delta t^2}{\text{irraggiamento, globale}}$$

Successivamente si passa alla determinazione della superficie utile, per ogni mese dell'anno, con la seguente espressione:

$$A_{lorda} = \frac{Q_{acs} + Q_{risc}}{\eta * I * t};$$

dove:

I : è l'irraggiamento medio giornaliero sul piano dei moduli;

t : sono i giorni del mese.

In seguito determino il numero di moduli necessario:

$$n^{\circ} \text{ moduli} = \frac{A_{lorda}}{A_{assorbente}}$$

tabella 26:

mesi	η	A_{lorda}	n° moduli
Gennaio	0,587	14,53	11,09
Febbraio	0,616	9,84	7,51
Marzo	0,659	6,57	5,01
Aprile	0,678	4,28	3,27
Maggio	0,729	1,53	1,17
Giugno	0,739	1,46	1,11
Luglio	0,749	1,41	1,07
Agosto	0,746	1,54	1,17
Settembre	0,702	1,92	1,46
Ottobre	0,671	3,70	2,82
Novembre	0,604	9,03	6,89
Dicembre	0,584	13,76	10,51

determinazione del numero di moduli

Si ricava adesso la media di superficie utile ricavata dalla tabella precedente, e si applicano i calcoli su una valutazione media annua delle quantità utili al fine del dimensionamento:

$$A_{\text{media}} = 5,80 \text{ m}^2;$$

- da qui risulta che il n° di pannelli = 2,08;
- scelgo n° pannelli = 5.

$$A_{\text{risultante}} = 5 \cdot \text{Sup.assorbente} = 6,55 \text{ m}^2.$$

Fisso una fattore di copertura: FS = 85 %, ottengo la quantità di energia che possibile ricavare dal dimensionamento di massima che è funzione delle seguenti quantità:

$$Q_{\text{solare}} = \sum FS \cdot \eta_{\text{medioannuo}} \cdot I_{\text{mediomense}} \cdot A_{\text{ris}} = 5669,02 \text{ kWh/ anno}$$

Nella tabelle che seguono si riportano i dati riassuntivi dei fabbisogni termici di ACS e riscaldamento; questi ultimi sono stati ricavati in precedenza nel calcolo dei fabbisogni termici della casa, secondo la norma UNI-TS 11300:

mesi	energia da fonte solare	fabb.termico mese ACS	fabb.termico per riscaldamento	fabbisogno ACS+RISC
Gennaio	228,948	262,535	584,221	846,756
Febbraio	278,851	237,128	461,501	698,630
Marzo	386,521	262,535	384,185	646,721
Aprile	438,418	254,066	224,152	478,219
Maggio	727,186	212,866	0	212,866
Giugno	738,095	206	0	206
Luglio	788,791	212,866	0	212,866
Agosto	722,349	212,866	0	212,866
Settembre	561,781	206	0	206
Ottobre	355,754	262,535	72,456	334,992
Novembre	226,725	254,066	267,081	521,147
Dicembre	215,601	262,535	492,849	755,384

tabella 27: fabbisogni termici di ACS e riscaldamento mensili

In questa parte del dimensionamento considero l'intervento della caldaia a biomassa, che dovrà compensare gli apporti termici relativi al soddisfacimento dei fabbisogni mensili ricavati in precedenza per la produzione combinata di ACS + riscaldamento; il fabbisogno di calore da biomassa è ricavato perciò come semplice differenza tra i consumi e gli apporti solari:

$$Q_{\text{biomassa}} = Q_{\text{acs+risc}} - Q_{\text{sol}} = 1263,18 \text{ kWh/anno}$$

$$\text{Carico ACS} = \frac{Q_{\text{ACS}}}{S_{\text{lorda}}};$$

mesi	fabbisogno da biomassa	carico ACS (l a 60 °C/giorno m ²)	carico fabbisogno calore totale
Gennaio	522,412799	86,360	107,205
Febbraio	303,590858	78,002	92,762

Marzo	99,1500367	86,360	97,537
Aprile	-142,874255	83,574	89,647
Maggio	0	70,021	70,021
Giugno	0	67,763	67,763
Luglio	0	70,021	70,021
Agosto	0	70,021	70,021
Settembre	0	67,763	67,763
Ottobre	-168,9934	86,360	89,015
Novembre	199,954186	83,574	92,165
Dicembre	449,949722	86,360	103,751

tabella 28: determinazione del fabbisogno da biomassa

Calcolo il volume specifico di accumulo dalla seguente tabella:

volume di accumulo specifico	
50	l/m ²
60	l/m ²
70	l/m ²
75	l/m ²

scelgo:

60 l/m², e moltiplico tale valore per la superficie utile dell'impianto:

$$V_{acc} = 60 \text{ (l/m}^2\text{)} \cdot 6,55 \text{ m}^2 = 393 \text{ litri}$$

Adesso ricavo l'energia captata e utilizzata mensilmente come il minimo tra l'energia da fonte solare ed il fabbisogno per ACS + riscaldamento; e il relativo fattore di integrazione F_{int} :

$$F_{int} = \frac{Q_{utiliz}}{Q_{acs + risc}};$$

mesi	Energia captata e utilizzata mensilmente	Fattore di Integrazione
Gennaio	228,9486563	0,270383
Febbraio	278,8512487	0,39914
Marzo	386,5210533	0,597662
Aprile	438,4189532	0,916774
Maggio	212,8666667	1
Giugno	206	1
Luglio	212,8666667	1
Agosto	212,8666667	1
Settembre	206	1
Ottobre	334,9923874	1
Novembre	226,7250435	0,435049
Dicembre	215,6010884	0,285419
	kWh/mese	

tabella 29: determinazione energia captata da impianto solare

Di seguito si riporta il grafico dei fabbisogni termici e degli apporti da fonte solare; c'è da notare come le differenze tra fabbisogno ed energia da fonte solare risultano uguali ai fabbisogni da fornire tramite caldaia a biomassa:

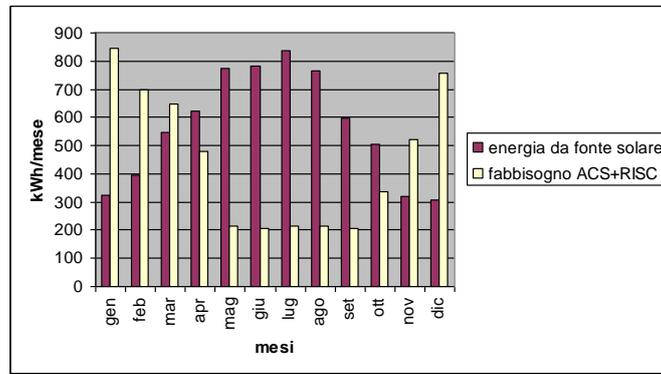


grafico 1: andamento curve di apporti e fabbisogni

3.3.2 Dimensionamento di massima del solare

Caratteristiche campo solare		
N° di collettori in parallelo per gruppo=	5	a
N° di gruppi in serie per stringa =	1	b
N° di stringhe in parallelo =	1	c
N° di collettori = (a)*(b)*(c) =	5	

Volume accumulo giornaliero impianto solare: medie annue

$$E_c = \frac{Q_{sol}}{N_{uti}} = \frac{3401}{365} = 18,56 \text{ kWh/g}$$

dove:

- E_c è l'energia captata giornaliera media annua;
- N_{uti} sono i giorni dell'anno.

$$Q_{(acs + risc)} \text{ giornaliero} = \frac{Q_{acs} + risc}{365} = 18,56 \text{ kWh/g;}$$

$$V_{acc} = \frac{860 \cdot (E_c - f_{cs} \cdot F_{int} \cdot FT_g)}{(\rho \cdot cv) \cdot \Delta T} = \frac{860 \cdot (18,56 - 0,2 \cdot 0,77 \cdot 13,15)}{1 \cdot 37} = 383 \text{ m}^3$$

Prevedo un volume di accumulo di 400 m^3 , ed un volume specifico per metro quadro di $61,06 \text{ m}^3$.

Portata circuito primario impianto solare

$$G = \frac{0,86 \cdot (\eta \cdot A_{ris} \cdot I_m)}{\rho \cdot cv \cdot \Delta T} = \frac{0,86 \cdot (0,67 \cdot 6,55 \cdot 147)}{33,5} = 16,86 \text{ l/h;}$$

portata di stringa: $G_s = G/(c) = 16,86 \text{ l/h;}$

portata collettore: $G_c = G_s/(a) = 3,33 \text{ l/h;}$

portata per mq di collettore: $G_m = G_c / S_{col} = 2,54 \text{ l/(h m}^2\text{);}$

Scambiatore di calore

potenza max da scambiare (orientativa) = $0,750 \cdot S_{col} = 4,91 \text{ kW;}$

3.3.3 Calcolo economico ed ambientale

Parametri tecnici

$$R_{\text{energ}} = \frac{Q_{\text{capitata}}}{\eta_r} = \frac{3757,39}{0,8} = 4679,76 \text{ kWh/ anno};$$

dove:

R_{en} : è il risparmio energetico annuo;

$$\eta_r = \frac{(75 + 3 \log(P_n))}{100} = 0,892$$

$$P_n = 58 \text{ kW};$$

Parametri finanziari:

$$i = \frac{((1+r) \cdot (1+f))}{(1+f') - 1} = 2\% ;$$

dove:

i : è il tasso di sconto effettivo;

r : è il costo reale del capitale;

f : è il tasso di inflazione;

f' : è il tasso di inflazione dell'energia.

Fattore di annualità:

$$FA[i,n] = \sum_{j=1,n} (1+i)^{-j} = \frac{(1 - (1+i)^{-n})}{i} = 16,35 \text{ anni};$$

Rateo di ammortamento:

$$a = \frac{1}{FA} = 0,06(1/\text{anni});$$

Parametri economici

Costo unitario energia:	C_{en}	0,068	€/kWh
Costi annui G&M	$C_{\text{g\&m}}$	1%	%dell'investimento
Investimento unitario:	I_{u0}	700	€/mq

tabella 30: costi unitari di investimento

Investimento lordo (IVA al 10%):

$$ILO = 1,1 \cdot Aris \cdot Io = 5043,5 \text{ €}$$

Investimento effettivo al netto della detrazione:

$$Io = (1 - df) * ILo = 2269,575 \text{ €}$$

dove:

df è la detrazione pari al 55%.

Parametri ambientali

Metri cubi di gas risparmiati E_n :

$$E_n = \frac{R_{en}}{P_{cal}} = 430,8 \text{ m}^3/\text{anno};$$

dove:

P_{cal} è il potere calorifico del metano di $10,7 \text{ kWh/m}^3$;

Indicatori economici

Flusso di cassa lordo:

$$FCL_0 = (C_{en} \cdot R_{en} - I_{L_0} \cdot C_{g\&m}) = 267,78 \text{ €/anno};$$

Tempo di Ritorno Semplice:

$$TRS = I_0/FCL_0 = 8,47 \text{ anni};$$

Tempo di Ritorno Attualizzato:

$$TRA = \frac{\ln\left(1 - \frac{I_0 \cdot i}{FCL_0}\right)}{\ln\left(\frac{1}{1+i}\right)} = 9,37 \text{ anni}$$

Valore Attuale Netto:

$$VAN = (FCL_0 \cdot FA[i,n]) - I_0 = 2109,15 \text{ €}$$

Indicatori ambientali

Emissioni evitate annue:

$$EE = E_n \cdot CO = 839,73 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{m}^3$$

dove:

CO sono le emissioni evitate unitarie pari a $1,92 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{m}^3$;

Alberi Equivalenti:

$$A = EE / A_{eq} = 104 \text{ alberi}$$

dove: A_{eq} è la CO_2 assorbita annualmente dalla vegetazione pari a $8 \text{ kg CO}_{2eq}/\text{albero}$

Costo pellets per caldaia a biomassa

$$Q(\text{da soddisfare con caldaia a biomassa}) = 1263 = \text{kWh/anno} = 4546,8 \text{ MJ/anno}$$

$$PCS(\text{pellets}) = 16,9 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Quantità pellets necessaria} = 2750,506/16,9 = 269,04 \text{ kg/anno}$$

$$\text{Costo pellets} = 0,3 \text{ euro/kg}$$

$$\text{Costo pellets annuo} = 269,04 \cdot 0,3 = 80,71 \text{ euro/anno}$$

3.3.4 Esempio di serbatoio di accumulo con allacciamento alla caldaia

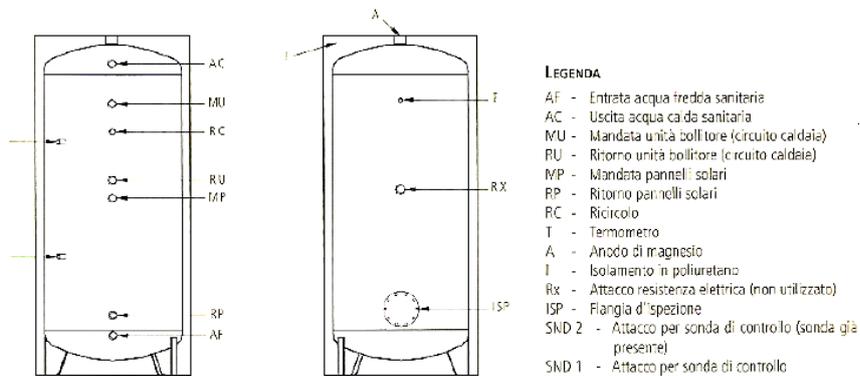


figura 10: unità di un serbatoio da 1000 l in acciaio vetrificato

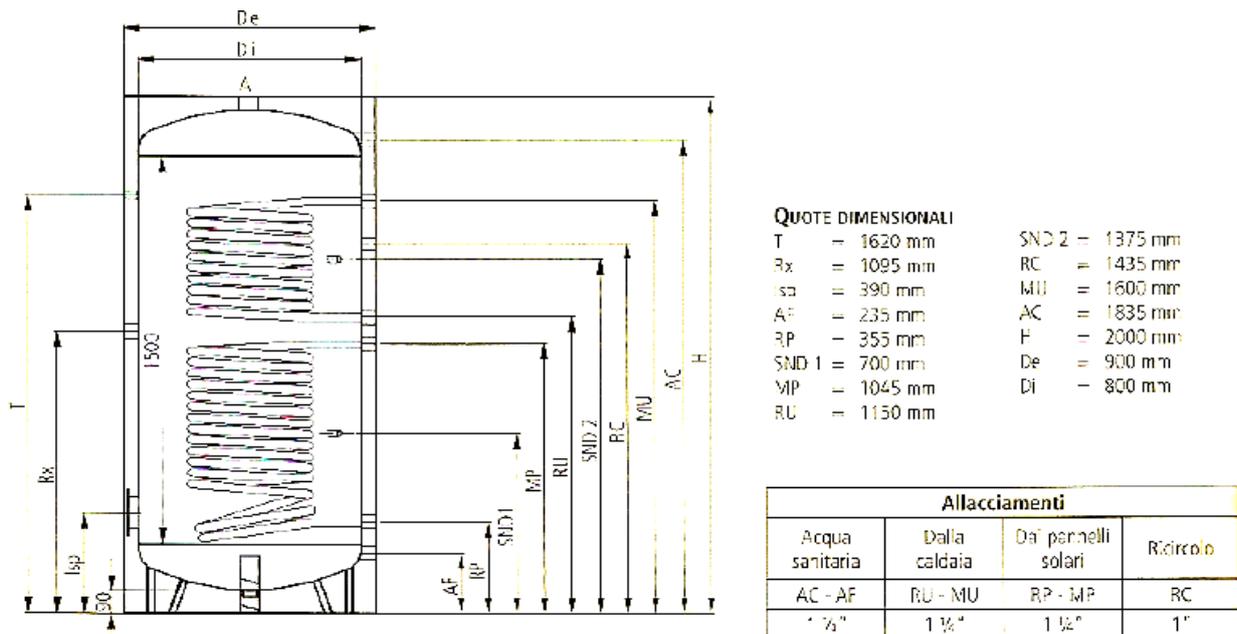


figura 11 : dimensioni ed allacciamenti unità bollitore di 1000 l in acciaio vetrificato

Capitolo 4 IMPIANTI A ENERGIA RINNOVABILE: IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Introduzione al fotovoltaico

Tra i molti luoghi comuni che caratterizzano l'Italia, ce n'è uno, sicuramente positivo, che può e deve acquisire un significato sempre più rilevante e concreto anche dal punto di vista energetico. Il 'paese del sole' è, di fatto, caratterizzato da una disponibilità della radiazione solare che, specie nelle regioni meridionali, raggiunge livelli davvero eccellenti, rendendo uno stesso dispositivo di conversione capace di generare fino al 40% di energia in più rispetto ai paesi del nord Europa. Naturalmente molte speranze sono riposte al nuovo conto energia che può potenzialmente trasformare il ricorso all'energia fotovoltaica in un vero e proprio investimento, non più solamente ambientale ed energetico; grazie alla possibilità di scambiare energia con la rete elettrica vendendo 'l'energia pulita' ad un costo nettamente superiore di quello di acquisto dell'energia convenzionale, infatti il fotovoltaico potrebbe risultare appetibile, a medio termine, anche dal punto di vista economico. L'idea di valorizzare l'energia prodotta, inoltre, ben si sposa con l'esigenza di innalzare il livello della qualità tecnica delle applicazioni e di monitorare continuamente la producibilità ed il corretto funzionamento degli impianti installati: ancora più importante diventa un'oculata progettazione degli impianti. Non sempre l'energia elettrica prodotta tramite un sistema fotovoltaico viene immediatamente consumata dall'utenza finale o viceversa, il picco di consumo di energia può verificarsi nelle ore serali quando la producibilità del sistema fotovoltaico è nulla. Per far fronte a questo squilibrio tra domanda e offerta è necessario prevedere un sistema di accumulo dell'energia convertita dalla fonte solare.

I sistemi fotovoltaici si classificano in sistemi isolati (stand-alone) e i sistemi connessi alla rete (grid-connected). Nel primo caso l'energia prodotta in eccesso o non immediatamente consumata viene accumulata in apposite batterie di accumulo. I sistemi connessi in rete, invece, riversano l'energia prodotta nella rete elettrica (locale o nazionale) a cui sono allacciate le utenze. In questo secondo caso è la rete stessa che funge da serbatoio di accumulo di capacità praticamente infinita. La progettazione di questi tipi di impianti risulta essere pertanto svincolata dalle esigenze di carico elettrico contingenti (non è necessario che l'impianto sia dimensionato per far fronte ai fabbisogni energetici, c'è la rete) e può di conseguenza focalizzare le scelte su altri tipi di vincoli fra cui, rispetto del budget preventivato, ampiezza delle aree interessate e il risultato estetico finale. In alcuni paesi europei, come la Germania, e da alcuni anni anche in Italia, all'energia elettrica immessa in

rete e prodotta da sistemi fotovoltaici viene riconosciuto un valore economico maggiore rispetto al chilowattora termoelettrico, al fine di incentivare la generazione distribuita da fonte solare. In questo ‘caso studio ’ si tratterà un sistema fotovoltaico connesso alla rete in quanto si vorrà dimostrare come è possibile abbattere i costi dei consumi annuali riguardanti solo l’energia elettrica.

4.1 Sistema fotovoltaico connesso alla rete (grid-connected)

Come già detto la principale caratteristica di questi sistemi è quella di essere allacciati alla rete elettrica pubblica come vere e proprie centrali di potenza o come sistemi di generazione distribuita (tipicamente integrati in architettura) che alimentano un’utenza, stabilendo un rapporto di scambio con la stessa. I principali componenti di un sistema grid-connected sono:

- generatore fotovoltaico
- quadro di campo
- cablaggio AC/DC
- inverter
- sistema di sicurezza e di misurazione dei parametri
- scelta dei moduli
- individuazione della tipologia di materiale attivo con cui sono realizzati i moduli (silicio cristallino o amorfo, CdTe, CIS etc.)

Tipo pannello	colore	disposizione	efficienza	clima
Film sottile: 	nero	Deposito di polvere di silicio su vetro: ottimo per luce diffusa	11%	freddo
Policristallino: 	Strato antiriflettente (ARC): da grigio a blu	Cristalli disorientati: buon compromesso per luce diffusa e diretta	13-14%	continentale
Monocristallino: 	Grigio-nero (richiesta di circa +5% di sup.)	Cristalli orientati: ottimo per luce diretta	14-16%	caldo

tabella 31: caratteristiche diversi tipi di pannelli in commercio

- individuazione della tipologia di modulo (con cornice o senza, in configurazione tradizionale o vetro-vetro, tegola fotovoltaica etc.)

4.1.1 Inverter funzionamento

L’inverter è il componente che interfaccia il generatore FV al carico o alla rete in corrente alternata: converte la corrente da continua in alternata secondo le specifiche richieste

dall'utilizzatore. A seconda del loro utilizzo, si hanno inverter sia per sistemi stand-alone che per sistemi grid-connected. Quest'ultimi sono collegati alla rete nazionale direttamente o tramite la rete dell'abitazione immettendo solo un surplus non utilizzato dei carichi domestici; i primi immettono automaticamente tutta l'energia prodotta in rete.

I generatori con potenze inferiori ai 5 kWp generalmente sono monofase. Per fornire alla rete elettrica tutta la massima potenza disponibile, gli inverter sono dotati di un inseguitore del punto di massima potenza (MPP tracker) che ne assicura il funzionamento nell'intorno Mpp al variare delle condizioni operative dell'impianto. Questa funzione si può trovare solo negli inverter per il funzionamento in parallelo alla rete, in quanto gli inverter per applicazioni isolate prelevano energia dalle batterie e quindi, normalmente, non si interfacciano con il generatore fotovoltaico. Graficamente, il punto di massima potenza corrisponde al punto di tangenza tra la caratteristica del generatore fotovoltaico per un certo valore della radiazione solare e l'iperbole di equazione $I \times V = \text{costante}$, corrispondente alla figura qui sotto:

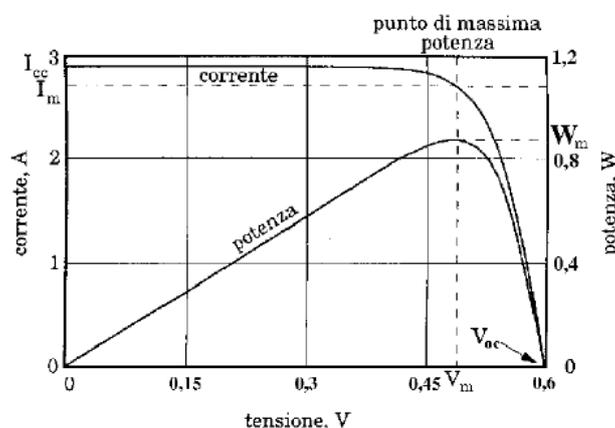


figura 12: curva caratteristica I-V e curva P-V di una cella fotovoltaica

La curva caratteristica di un generatore FV non rimane costante ma varia istantaneamente al modificarsi delle condizioni di irraggiamento solare e col variare della temperatura; queste continue variazioni provocano il conseguente spostamento del punto di massima potenza del generatore a diversi valori di coppia I, V. Una delle tecniche utilizzate dai moderni MPPT si basa nell'individuazione del punto di massima potenza sulla curva caratteristica del generatore provocando, a intervalli regolari, delle piccole variazioni di carico che si traducono in scostamenti dei valori di tensione e di corrente, valutando poi se il nuovo prodotto $I \times V$ è maggiore o minore del precedente. Se si registra un aumento si continua a procedere allo stesso modo nella direzione considerata fintantoché non si registra una diminuzione, altrimenti si prova con variazioni di carico di segno opposto adottando lo stesso metodo di ricerca.

4.1.2 Ponte di conversione

Il ponte di conversione è il cuore del convertitore e permette di passare dalla corrente continua ad alternata facendo uso di dispositivi semi conduttori pilotati con sequenze ad impulsi di

comando controllati. In figura è mostrato il principio di funzionamento di un convertitore full-bridge dotato di filtro in uscita in cui i dispositivi di potenza sono schematizzati con interruttori. Chiudendo ed aprendo alternativamente le coppie I1-I4 e I2-I3 si ottiene la conversione da continua ad alternata.

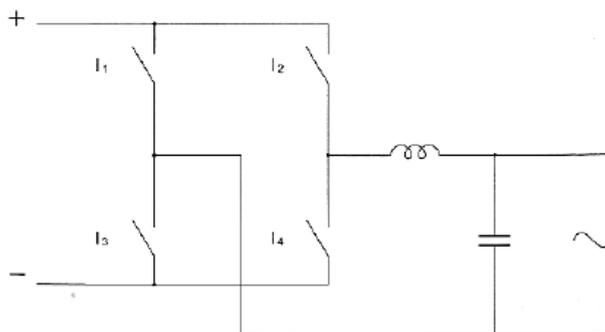


figura 12: schema di principio di un ponte di conversione full-bridge

4.1.3 Trasformatore

Le funzioni svolte dal trasformatore sono essenzialmente due:

- adeguamento di tensione del circuito primario (uscita dal ponte di conversione) con il valore richiesto dal carico;
- separazione galvanica tra generazione fotovoltaica e utenza.

La figura seguente mostra 3 casi possibili, relativi alla collocazione del trasformatore in un inverter a 2 stadi per servizio parallelo alla rete. Nel terzo caso non c'è trasformatore perché non c'è separazione galvanica e quindi il carico viene controllato elettronicamente:

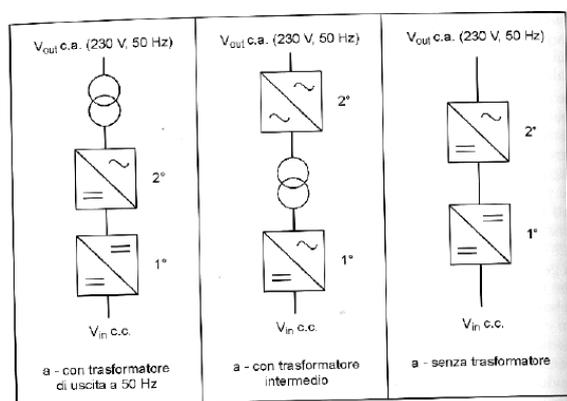


figura 13: schema collocazione del trasformatore in un inverter a 2 stadi per servizio parallelo alla rete

Qui di seguito si riporta uno schema a blocchi di principio di un inverter parallelo alla rete:

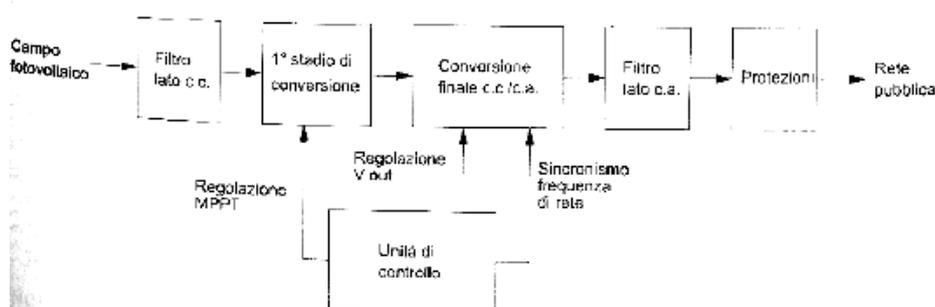


figura 14: schema a blocchi inverter parallelo a rete

In tali tipo di inverter è sempre presente la protezione MPPT, e la macchina deve poter variare la propria impedenza di ingresso per poter assumere quella ottimale corrispondente al massimo trasferimento di potenza. Questa funzione viene svolta da un primo ponte di conversione cc/ca o cc/cc comandato dall'unità di controllo; è importante che questa prima conversione non induca eccessive variazioni periodiche nell'assorbimento di corrente (ripple in ingresso): da qui la presenza di una sezione di filtraggio lato continua.

Un secondo ponte di conversione , sincronizzato con la frequenza di rete, provvede successivamente a fornire la potenza di uscita con le caratteristiche di tensione e frequenze richieste. In questo stadio viene anche realizzata la regolazione della tensione di uscita in modo tale che l'inverter sia visto dalla rete come un generatore di corrente. Allo stadio di conversione fa seguito una sezione di filtraggio delle armoniche e, le protezioni lato carico costituite, oltre che da un dispositivo di intervento per massima corrente, anche dalle protezioni di interfaccia richieste dal gestore della rete a cui la macchina è collegata.

4.1.4 Allacciamento alla rete di distribuzione

L'allacciamento di generatori elettrici alla rete dell'energia è regolamentato dalla norma CEI 11-20 che fa riferimento alle reti di I e II categoria, cioè di bassa e media tensione. La tabella seguente mostra le modalità di allacciamento consentite per taglie di convertitori statici in impianti fotovoltaici:

	Allacciamento bt 1:6 kW	Allacciamento bt > 6 kW	Allacciamento MT
Rete elettrica	I categoria	I categoria	II categoria
Allacciamento monofase	Consentito	Non consentito	Non consentito
Separazione galvanica	Non obbligatoria per allacciamento monofase	Obbligatoria	Obbligatoria

tabella 32: categorie di allacciamento

La norma CEI 11-20 e la variante VI prescrivono, inoltre, alcuni dispositivi di protezione che devono intervenire nel caso avvenga un guasto o un mal funzionamento nella rete di distribuzione alla quale l'impianto fotovoltaico è collegato, nella rete presente direttamente a livello del generatore. Essi sono:

- dispositivo generale: intervento in caso di guasto alla rete interna servita dal generatore;
- dispositivo di generatore: 1° livello di intervento nel caso di guasto al sistema di generazione, che interviene nel caso di guasto o malfunzionamento dell'inverter, posto a valle del punto di consegna dell'energia
- dispositivo di interfaccia: nel caso di anomalie nella rete di distribuzione alla quale l'impianto è collegato. Esso deve essere a sicurezza intrinseca cioè essere dotato di bobina di apertura a mancanza di tensione che deve provocare l'apertura dello stesso dispositivo nel caso di intervento corretto e non.

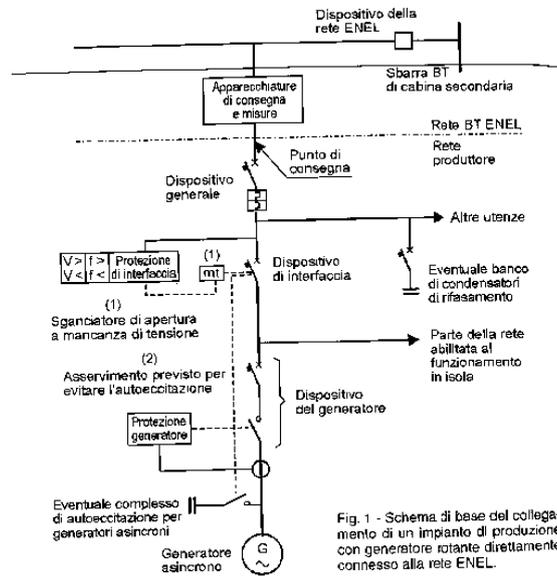


Fig. 1 - Schema di base del collegamento di un impianto di produzione con generatore rotante direttamente connesso alla rete ENEL.

4.1.5 Misura dell'energia prodotta ed incentivata

Ai sensi della delibera AEEG 40/60 ENEL è responsabile dell'installazione e manutenzione dei complessi di misura dell'energia prodotta ed immessa in rete da impianti fotovoltaici incentivati. Al fine di consentire ciò deve essere il cliente produttore a realizzare il proprio impianto in conformità alla norma CEI 64-8 e alla guida CEI 82-25.

4.1.6 Parametri e curve caratteristiche e proprietà degli inverter

Efficienza di conversione η_{con}

L'efficienza di conversione tiene conto delle perdite che si generano durante il processo di conversione della corrente da continua ad alternata:

$$\eta_{con} = P_{AC} \text{ (potenza effettiva uscita)} / P_{DC} \text{ (potenza in entrata)}$$

Efficienza di tracking η_{TR}

Dato che i parametri del generatore cambiano continuamente durante il giorno a causa della variazione delle condizioni operative interviene il MPP. Tale efficienza misura la qualità del tracking:

$$\eta_{TR} = P_{DC} \text{ (potenza istantanea in ingresso)} / P_{PV} \text{ (massima potenza istantanea sviluppata dal generatore)}$$

Efficienza statica

$$\eta_{INV} = \eta_{con} * \eta_{TR}$$

Questo tipo di efficienza si riferisce a diversi tipi di carico. L'efficienza nominale dichiarata dal costruttore si riferisce al funzionamento in condizioni nominali (V_n, I_n); accanto a questo valore viene fornita anche l'efficienza rilevata in corrispondenza ad un carico parziale variabile tra l'80-50% del valore della potenza nominale.

4.1.7 Sistemi con inverter centralizzato

Il caso di impianti con bassa tensione nominale ($V_{cc} < 120V$), solo pochi moduli vengono connessi in serie a formare una stringa (normalmente da 3 a 5 moduli di dimensioni standard). Uno dei vantaggi di stringhe così corte è quello di minimizzare l'effetto di riduzione della potenza complessiva in caso di ombreggiamento parziale di un modulo.

Lo svantaggio principale sarà l'elevato valore delle correnti in gioco a causa del parallelo tra un maggiore numero di stringhe nel quadro di campo. Diventa necessario utilizzare cavi di sezione relativamente grande per mantenere le perdite ohmiche entro valori accettabili. Salvo casi particolari stabiliti dalla norma CEI 64, inoltre, il limite dei 120V corrisponde alla 'tensione di contatto limite convenzionale, entro la quale è possibile realizzare sistemi a bassissima tensione di sicurezza (SELV) o a bassissima tensione di protezione (PELV).

Collegamento in serie: $V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$; $I = \min (I_1, I_2, I_3, \dots, I_n)$
 V stringa = $n \times V$ pannello n numero di moduli in una stringa
collegamento in parallelo: $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$; $V = \max (V_1, V_2, V_3, \dots, V_n)$
 I campo = $m \times I$ pannello m numero di stringhe in un campo

4.1.8 Dimensionamento dell'inverter: la potenza nominale

Come regola pratica, il rapporto tra la taglia del generatore e quella dell'inverter ad esso associato è di 1 a 1. comunque un range accettabile per il dimensionamento è quello di seguito riportato:

$$0,7 \cdot P_{pv} < P_{inv} < 1,2 \cdot P_{pv}$$

In generale è preferibile scegliere un inverter con una potenza leggermente inferiore a quella del generatore, poiché l'intervallo a cui lavora alla massima efficienza è tra il 50% e l'80% della potenza nominale del dispositivo e che il funzionamento alla massima potenza è davvero molto limitato nel corso dell'anno. In questo modo viene potenziato il funzionamento anche con basso irraggiamento: l'efficienza dell'inverter è molto bassa per potenze inferiori del 10% della potenza nominale, ma cresce molto velocemente al crescere della radiazione disponibile. Nel caso contrario (potenza dell'inverter maggiore di quella del generatore) l'andamento dell'efficienza resta relativamente piatto ed assume livelli ottimali solo in corrispondenza di elevati valori della radiazione solare. In caso di 'sottodimensionamento dell'inverter' è necessario verificare i livelli di sovraccarico tollerati dall'inverter stesso. Per quanto riguarda la tensione di lavoro, si consideri che il livello di tensione all'ingresso all'inverter è la somma delle tensioni dei moduli connessi in serie a formare una stringa: come la tensione dei moduli, di conseguenza, anche la tensione dell'intero generatore è dipendente dalla temperatura di lavoro delle celle; durante la progettazione è bene considerare sia il comportamento estivo che quello invernale come estremi dell'intervallo di lavoro. Può essere utile, inoltre, considerare che al diminuire del rapporto tra la tensione in ingresso e in uscita dall'inverter, l'efficienza complessiva di conversione aumenta. È importante verificare che, per l'inverter, il range di

funzionamento ottimale del dispositivo di inseguimento della massima potenza (MPPT) sia compatibile con la curva caratteristica del generatore FV.

4.1.9 Massimo numero di moduli connessi in serie in una stringa

Il limite superiore della tensione va calcolato simulando condizioni invernali con temperature di lavoro di modulo pari a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. All'abbassarsi della temperatura, la tensione del modulo cresce. Il valore della tensione più elevato, che può essere raggiunto durante il funzionamento dei moduli (in determinate condizioni di temperatura ed irraggiamento), è data dalla tensione di corto circuito. A titolo di esempio, si pensi alla possibilità di un momentaneo fuori servizio della rete elettrica durante un'assoluta giornata invernale: il generatore viene escluso dal circuito, la tensione può crescere ed essere troppo alta al momento della nuova chiusura del circuito in corrispondenza del ripristino della rete. La tensione raggiunta in questi casi deve essere inferiore della tensione massima sopportabile in ingresso dall'inverter. Il numero massimo di moduli che è possibile connettere in serie, di conseguenza, viene ricavato dal rapporto tra tensione massima in ingresso all'inverter e tensione di corto circuito per moduli operanti a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$n_{\max} = V_{\max (\text{inv})} / V_0 (\text{Tm} = -10^{\circ}\text{C})$$

la tensione $V_0 (\text{Tm} = -10^{\circ}\text{C})$ non è sempre specificata tra i dati caratteristici forniti dal costruttore. Al posto di tale valore può essere utilizzata la variazione della tensione in percentuale sul valore in condizioni standard o in mV su $^{\circ}\text{C}$. il calcolo può essere condotto come segue (considerando che ΔV viene fornito con segno negativo, requisito fondamentale per l'applicazione della formula):

con ΔV in % per $^{\circ}\text{C}$:

$$V_0 (\text{Tm} = -10^{\circ}\text{C}) = (1 - 35\text{ }^{\circ}\text{C} \times \Delta V / 100) \times V_0 (\text{stc})$$

con ΔV in mV per $^{\circ}\text{C}$:

$$V_0 (\text{Tm} = -10^{\circ}\text{C}) = V_0 (\text{stc}) - 35\text{ }^{\circ}\text{C} \times \Delta V$$

Se nessuna di tali indicazioni viene fornita, è possibile utilizzare diagrammi come quello riportato in figura 12 nel quale si può osservare come la tensione cresca circa del 14% a -10°C (rispetto alle condizioni standard, STC):

$$V_0 (\text{Tm} = -10^{\circ}\text{C}) = 1,14 \times V_0 (\text{stc})$$

4.1.10 Numero minimo di moduli da collegare in una stringa

Durante il periodo estivo, moduli su tetti possono facilmente raggiungere temperature superiori ai $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tale valore di temperatura è, in genere, utilizzato per determinare il numero minimo di moduli da collegare in serie. Nel caso di moduli posizionati in modo da essere ventilati durante il funzionamento, il valore di riferimento può scendere a 60°C .

In condizioni di irraggiamento estivo, un sistema FV ha una tensione inferiore a quella di riferimento in condizioni standard, a causa dell'aumento notevole della temperatura di lavoro. Se questa scende al di sotto del valore minimo utile per il funzionamento dei dispositivi di inseguimento della massima potenza (MPPT, integrati nell'inverter), il generatore perde la possibilità di essere 'condotto' al punto di lavoro ottimale e può arrivare ad essere escluso dal circuito. Per questa ragione, il sistema dovrebbe essere dimensionato in modo che il minimo numero di moduli connessi in serie (a formare una stringa) sia data dal rapporto tra il valore soglia del dispositivo MPP e il valore di tensione dei moduli alla temperatura massima di lavoro (70 – 75 °C):

$$n_{\min} = V_{\text{mpp (min inverter)}} / V_{\text{mpp (modulo T= 70°C)}}$$

se la tensione di massima potenza del modulo a 70 °C non è specificata sulla scheda tecnica del prodotto, questa può essere calcolata come segue, a partire dal valore di tensione alla massima potenza in condizioni standard, in maniera del tutto analoga a quella vista per la tensione a T = -10°C:

con ΔV in % per °C:

$$V_{\text{mpp (modulo T= 70°C)}} = (1 + 45 \text{ °C} \times \Delta V / 100) \times V_{\text{mpp (stc)}}$$

con ΔV in mV per °C:

$$V_{\text{mpp (modulo T= 70°C)}} = V_{\text{mpp (stc)}} + 45 \text{ °C} \times \Delta V.$$

In genere si ipotizza che la perdita di tensione che caratterizza una cella in silicio cristallino che lavora a 70 °C è pari al 18 – 22 % della tensione in STC:

$$V_{\text{mpp (modulo T= 70°C)}} = 0,82 \times V_{\text{mpp (STC)}}$$

4.1.11 Determinazione del numero di stringhe

Una volta stabilito il numero massimo di moduli da collegare in serie, conoscendo in partenza la taglia finale del generatore completo, ne discende il numero totale di stringhe. Occorre verificare, a questo punto, che la massima corrente in parallelo delle stringhe non superi la corrente massima tollerata in ingresso dell'inverter. Da tali considerazioni, discende la seguente espressione:

$$N_{\text{stringhe}} \leq I_{\text{max inv}} / I_{\text{stringa}}$$

Dimensionamento e scelta dei cavi (norma cei 64)

Una volta dimensionato l'inverter, è necessario realizzare la progettazione del circuito elettrico. In questa fase può essere stabilito un valore per la lunghezza dei cavi tenendo conto di tre parametri:

- tensione di isolamento: i sistemi FV normalmente non superano la tensione d isolamento dei cavi standard (tensioni nominali da 450 a 1000V). con sistemi di grossa taglia e stringhe di notevole lunghezza, occorre esaminare anche il valore della massima tensione di circuito aperto V_{oc} (raggiungibile a -10 °C)

- amperaggio dei cavi: la tensione dei cavi è dimensionata proporzionalmente alla massima corrente prevista. La massima corrente che può scorrere lungo i cavi di collegamento dei moduli all'interno di ciascuna stringa è la corrente di corto circuito del generatore, a cui occorre sottrarre il valore della corrente di corto circuito di una singola stringa

$$I_{\max} = I_{cc\ pv} - I_{cc\ stringa}$$

è possibile utilizzare cavi per il collegamento dei moduli in grado di sopportare tale corrente oppure utilizzare fusibili di stringa per proteggere cavi dal sovraccarico (scelta non adatta se si sceglie un inverter di stringa, poiché occorre considerare che la corrente di corto circuito del generatore è vicina alla corrente nominale della stringa, e i fusibili sono sensibili a valori multipli del valore di lavoro per cui non posso usarli per proteggere i cavi).

La portata in regime permanente dei cavi deve essere superiore o, al più, uguale a quella di intervento:

$$I_{Z\ CAVO} \leq I_{a\ DISP.\ Protezione}$$

$$\text{con } I_{MAX\ STRINGA} \geq I_{Z\ CAVO}$$

- perdite lungo i cavi stessi: l'effettiva perdita è calcolata, di conseguenza, una volta stabilito il valore effettivo della sezione dimensionamento del cavo principale del circuito in continua: esso deve sopportare le correnti massime producibili dal generatore fotovoltaico. È dimensionato per tollerare 1,25 volte la corrente di corto circuito del generatore in condizioni standard:

$$I_{MAX} = 1,25 \times I_{CC\ (STC)\ FV}$$

Anche in questo caso occorre tenere in considerazione i fattori di riduzione della temperatura e, con fasci di cavi, il fattore di accumulo

$$I_{\max} \leq I_Z$$

Nota :

- MPPT (inseguitore massima potenza) è un sistema di controllo dell'inverter che agendo per tentativi sposta la curva di potenza a valori diversi di V e I, e verifica se così facendo si ha un incremento di potenza;
- Ponte di conversione: esegue la conversione da corrente alternata a continua
- Trasformatore: adegua la tensione del circuito primario con il valore richiesto dal carico; provvede alla separazione galvanica tra generatore fotovoltaico e utenza

- Sistema di protezione: sistema protezione massima potenza e di sicurezza di interfaccia con la rete di distribuzione elettrica nazionale
- Potenza massima AC: massima potenza immessa in rete per un breve periodo di tempo, prima che l'inverter si surriscaldi; indicativamente è il 110% della potenza nominale AC
- Potenza che l'inverter può rilasciare indefinitamente
- Sistema master-slave: studiato per ottimizzare la potenza anche in regime variabile per irraggiamento limitato. Il funzionamento master si attiva per parziale irraggiamento, mentre quello slave si attiva se esso cresce.

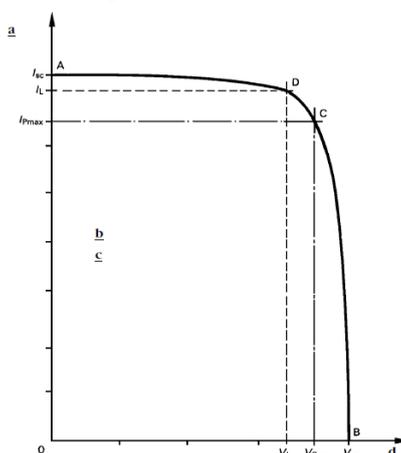


figura 16: esempio curva corrente- tensione (I-V)

Condizioni di Prova Standard (STC)

Comprendono le seguenti condizioni di prova normalizzate (CEI EN 60904-3):

- Temperatura di cella: $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Irraggiamento: 1000 W/m^2 , con distribuzione spettrale di riferimento (massa d'aria AM 1.5).

Considerazioni per valutare l'energia irraggiata

L'energia generata dipende:

- dal sito di installazione (latitudine, radiazione solare disponibile, temperatura, riflettanza
- della superficie antistante i moduli);
- dall'esposizione dei moduli: angolo di inclinazione e angolo di orientazione;
- eventuali ombreggiamenti o sporcamenti del generatore fotovoltaico;
- dalle caratteristiche dei moduli: potenza nominale, coefficiente di temperatura, perdite per
- disaccoppiamento o mismatch;
- dalle caratteristiche del BOS: efficienza inverter, perdite nei cavi e cadute sui diodi.

4.2 Impianto della casa

Di seguito si riporta lo schema di collegamento alla rete nel caso di impianto grid-connected:

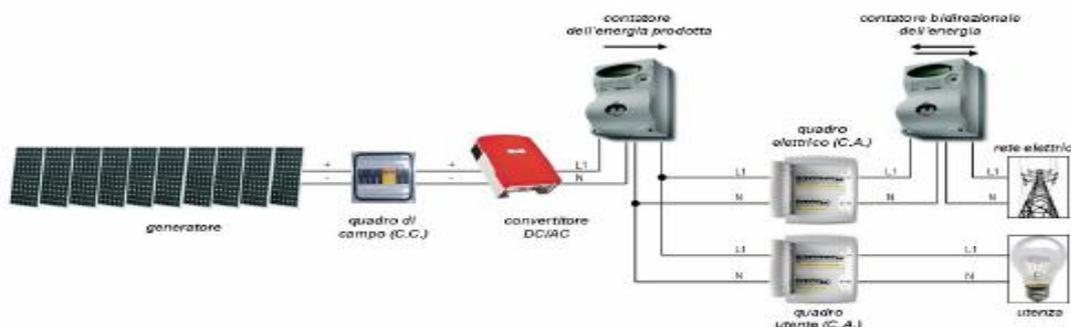


figura 17: schema collegamento alla rete

Il dimensionamento di un impianto fotovoltaico dipende essenzialmente dalla superficie del tetto, dall'orientamento del tetto e da eventuali ombreggiamenti. Possibile orientamento su un edificio con tetto orientato verso sud ed est.

4.2.1 Calcolo del dimensionamento dell'impianto di casa mia

La casa in questione è di tipo unifamiliare e senza zone d'ombra con tetto a falda priva di ombreggiamenti.

I dati di progetto necessari sono i seguenti:

- la località nella quale è installato l'impianto;
- il consumo annuo di energia elettrica (kWh);
- l'inclinazione della superficie captante (gradi);
- l'orientamento della superficie captante.
- Energia elettrica fornita per unità di superficie

Per i consumi di energia elettrica presunti si è considerata una stima effettuata dalla federconsumatori che indica in 2700 kWh il consumo medio di una famiglia italiana; l'equivalente in euro è di:

DATI della casa	
quota ortometrica casa	660 m.s.l.m.
direzione esposizione tetto	sud
azimut	0°
superficie utile tetto	78,4 m²
inclinazione della falda	30°
nessun ombreggiamento	nessuno
consumo elettrico annuo presunto	2700 kWh
latitudine	37,57 N
longitudine EST	14,29 E

tabella 33: dati della casa

Di seguito si riporta il diagramma solare cilindrico per la latitudine considerata in cui si legge l'altezza solare nei diversi mesi dell'anno e per i diversi valori di angolo azimutale:

Diagramma solare cilindrico - latitudine 37°N

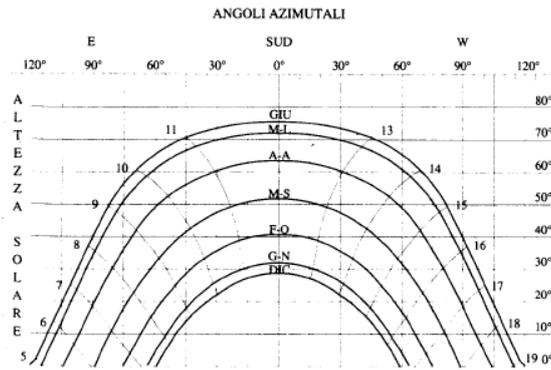


figura 18: diagramma solare cilindrico

Se la superficie di captazione non è orizzontale è necessario moltiplicare questo valore di radiazione per un coefficiente correttivo che tenga conto dell'inclinazione e dell'orientamento della superficie. I coefficienti correttivi da applicare sono riportati in tabella 3 e tengono conto di inclinazioni da 20° a 90° (superfici verticali) e di orientamenti che vanno da 0 (corrispondente a SUD) a $\pm 90^\circ$ (orientamento a EST o a OVEST).

Il valore positivo dell'orientamento corrisponde ad una esposizione verso OVEST mentre quello negativo corrisponde ad una esposizione verso EST.

Orient. (gradi)	Inclinazione (gradi)				
	20	30	45	60	90
0 (Sud)	1,11	1,13	1,11	1,03	0,75
± 15	1,10	1,12	1,11	1,03	0,76
± 30	1,09	1,11	1,10	1,03	0,78
± 45	1,07	1,09	1,08	1,02	0,79
± 60	1,05	1,06	1,04	0,99	0,78
± 90 (Est-Ovest)	0,99	0,97	0,94	0,88	0,70

figura 19: tabella coefficienti correttivi della radiazione

I dati della radiazione incidente sono stati presi dal seguente modello di calcolo:

ENEA - Grande Progetto Solare Termodinamico
Calcolo della radiazione solare globale giornaliera media mensile (R_{ggmm}) su superficie inclinata
Media quinquennale 1995÷1999 Dati di input: Coordinate della località: - latitudine: 37°57' - longitudine: 14°27' Orientazione della superficie: - azimut solare: 0° - inclinazione: 30°
Modello per il calcolo della frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale: ENEA-SOLTERM
Coefficiente di riflessione del suolo: 1

mesi	radiazione media giornaliera	Energia solare incidente utile
Gennaio	3,2	110,112
Febbraio	4,11	127,738
Marzo	4,81	165,512

Aprile	5,48	182,484
Maggio	6,14	211,277
Giugno	6,35	211,455
Luglio	6,48	222,976
Agosto	5,96	205,083
Settembre	5,09	169,497
Ottobre	4,35	149,683
Novembre	3,18	105,894
Dicembre	3,03	104,262
Totale anno		1965,976
Unità di misura	kWh/m²	kWh/m²

tabella 34: radiazione solare incidente a 30°

Una volta ottenute le quantità di energia solare incidente utile sulla superficie da noi considerata si passa alla determinazione del dimensionamento dell'impianto fotovoltaico.

Il primo ragionamento da fare riguarda l'efficienza del sistema, composto dai moduli fotovoltaici e dal BOS che risulta vincolante per la resa finale dell'impianto:

$$\eta_{\text{sistema}} = \eta_{\text{moduli}} \cdot \eta_{\text{bos}} = 0,15 \cdot 0,85 = 12\%$$

L'energia elettrica unitaria (al m²) prodotta dall'impianto risulterà pari all'efficienza del sistema per l'energia solare incidente utile I sol,anno:

Energia solare incidente utile	Efficienza pannelli	Efficienza impianto	Efficienza complessiva	Energia elettrica fornita unitaria
110,112	0,15	0,85	0,127	14,039
127,738	0,15	0,85	0,127	16,286
165,512	0,15	0,85	0,127	21,102
182,484	0,15	0,85	0,127	23,266
211,277	0,15	0,85	0,127	26,937
211,455	0,15	0,85	0,127	26,960
222,976	0,15	0,85	0,127	28,429
205,083	0,15	0,85	0,127	26,148
169,497	0,15	0,85	0,127	21,610
149,683	0,15	0,85	0,127	19,084
105,894	0,15	0,85	0,127	13,501
104,262	0,15	0,85	0,127	13,293
1965,976			0,127	250,662

tabella 35: calcolo dell'energia elettrica fornita unitaria

$$E_{el,u} = \eta_{\text{sistema}} \cdot I_{\text{sol,anno}} = 250,662 \text{ kWh}_{el} / (\text{m}^2 \text{ anno});$$

Adesso posso calcolare la superficie dell'impianto fotovoltaico, come segue:

$$S_{\text{imp}} = \frac{C_{el}}{E_{el,u}} :$$

Energia elettrica fornita unitaria	consumo elettrico medio mensile	superficie FV
14,039	225	16,02
16,286	225	12,43
21,102	225	9,59
23,266	225	8,70
26,937	225	7,51
26,960	225	7,51
28,429	225	7,12

26,148	225	7,74
21,610	225	9,37
19,084	225	10,61
13,501	225	14,99
13,293	225	15,23

tabella 36: calcolo superficie fotovoltaico

E conseguentemente, dividendo per la superficie unitaria di un modulo, si ottengono il numero totale di moduli da installare:

$$n^{\circ} \text{ moduli} = \frac{S_{imp}}{S_{mod}}$$

superficie unitaria modulo fotovoltaico	numero di moduli necessari	potenza di picco
1,663	9,63	2264,441
1,663	7,47	1756,771
1,663	5,76	1355,840
1,663	5,23	1229,740
1,663	4,51	1062,148
1,663	4,51	1061,256
1,663	4,28	1006,418
1,663	4,65	1094,226
1,663	5,63	1323,964
1,663	6,37	1499,216
1,663	9,01	2119,175
1,663	9,15	2152,340

tabella 37: calcolo della potenza di picco dell'impianto FV

Dopo aver ricavato le suddette quantità posso calcolare la potenza di picco dell'impianto, considerando una potenza del singolo modulo di 235 W.

Adesso, dopo aver fatto i calcoli su tutti i mesi dell'anno delle precedenti quantità, debbo stabilire quale sarà l'effettiva potenza dell'impianto; per fare questo dovrò scegliere il numero di moduli che si preferisce installare. Tale valore lo ricavo dalla precedente tabella, ossia scelgo il mese di dicembre come stima dei moduli necessari, approssimando per eccesso a 10 moduli necessari:

$$P_{imp} = n^{\circ} \text{ moduli} \cdot 235 = 10 \cdot 235 = 2350 \text{ W}_p$$

A questo punto, ricalcolo la nuova superficie equivalente dell'impianto:

$$S_{eq} = 10 \cdot 1,66 = 16,632 \text{ m}^2$$

L'energia prodotta annualmente dal nostro impianto risulterà pari a:

$$E_{el} = \eta_{sistema} \cdot S_{eq} \cdot I_{sol,anno} = 4169,010 \text{ kWh/anno};$$

$$\text{rendita} = E_{el} / (P_{imp} / 1000) = 1774,046 \text{ kWh/anno/kW}_p;$$

$$\text{efficienza nominale} = P_{imp} / S_{eq} = 0,14,$$

4.2.2 Verifica montaggio

Divido la superficie totale del tetto per la superficie del singolo modulo (1,310 m²) e verifico se è pari al numero di moduli:

$$78/1,66 = 47$$

Naturalmente il numero è eccessivo poiché ai fini del nostro dimensionamento è importante coprire i fabbisogni di energia elettrica annuale e non coprire la superficie utile del tetto di installazione; questo vale anche per il conto energia in cui si dimostrerà l'inutilità di installazione di un impianto sovradimensionato rispetto ai consumi proprio per un costo di investimento troppo eccessivo.

4.2.3 Montaggio in disposizione orizzontale

Lunghezza del tetto 9,8 m:

divido tale lunghezza per quella del singolo modulo:

$$9,8 / 1,68 = 5,83 \text{ m (che è il numero massimo di moduli da montare in lunghezza);}$$

Larghezza tetto 8 m:

$$8 / 0,994 = 7,49$$

(arrotondo a 7 che è il numero massimo di moduli da montare in larghezza)

Montaggio in disposizione orizzontale

$$8 / 0,994 = 8,04$$

(posso montare in questa disposizione ben 8 moduli)

4.2.4 Dati tecnici moduli ed inverter

La seguente tabella indica le caratteristiche dell'inverter da scegliere ed abbinare al generatore.

Descrizione Inverter	Fronius IG 30	dati modulo fotovoltaico:		
Dati di Ingresso		lunghezza	1,68	m
Tensione MPP	150 - 400 V	larghezza	0,99	m
Massima tensione in ingresso	500 V	area	1,6632	m²
Dati di potenza	2500 - 3600 W _p	peso	21,5	kg
Massima corrente in ingresso	19 A	prezzo	1390	euro
Dati in Uscita		caratteristiche elettriche		
Tensione nominale in uscita	2500 W	V_{oc} (tensione a circuito aperto)	36,6	V
Massima tensione in uscita	2650 W	V_{mp} (tensione alla max potenza)	29,05	V
Massima efficienza	94,3 %	I_{sc} (corrente cortocircuito)	8,75	A
Efficienza Euro	92,70%	I_{mp} (corrente alla max potenza)	8,1	A
Tensione/ frequenza	230 V / 50 Hz (60 Hz)	potenza di picco W_p	235	W_p
Fattore di distorsione	< 3,5 %	specifiche tecniche		

Fattore di Potenza	1	Numero celle e connessioni	60 (6x10)	
Potenza consumata la notte	0 W	massimo voltaggio	1000	V
Costo	€ 1.813,90	coefficiente di temperatura		
		Coefficiente di T, V_{oc}	-0,145	V/ °C
		Coefficiente di T, V_{mpp}	-0,145	V/ °C

tabella 38: caratteristiche tecniche dell'inverter

Per gli impianti fino a 5 kW_p, i cui moduli non soggetti ad ombreggiamento e sono inclinati ed orientati alla stessa maniera, spesso è ragionevole installare un unico inverter centralizzato. Per impianti più grandi invece l'installazione di più inverter può ridurre il rischio di fuori servizio per guasto. La potenza dell'inverter è da stabilire in base a quella del generatore FV, ovvero in base alla somma delle potenze di tutti i moduli FV da installare.

Le condizioni di potenza sono però riferite alle condizioni STC: 1000W/m², 25°C, AM = 1,5), che nella realtà si verificano raramente. Pertanto occorre scegliere un inverter con potenza più bassa del 5-10% ca. rispetto alla potenza di picco del generatore fotovoltaico. In nessun caso si devono però superare i valori massimi di corrente e tensione ammessi all'ingresso dell'inverter. Pertanto nel caso di un generatore di 2,59 kW_p di potenza nominale e 16 x 162 W_p = 2,592 kW_p sarebbe ideale un inverter di potenza nominale:

$$2,592 \times (0,90 \dots 0,95) = 2,332 \dots 2,4624 \text{ kW}$$

Scelgo un inverter di potenza nominale di 2,50 kW_p.

Nel nostro caso, tetto non inclinato ed non orientato in maniera ottimale, possiamo ulteriormente sottodimensionare l'inverter per una differenza maggiore del 10% rispetto alla potenza del generatore.

4.2.5 Individuazione delle caratteristiche tecniche e della tensione di modulo

dati modulo fotovoltaico:		
modello	xp 60/156 (MBB)-235(SUNERG POLY)	
lunghezza	1,68	m
larghezza	0,99	m
area	1,6632	m²
peso	21,5	kg
prezzo	1390	euro
caratteristiche elettriche		
Voc(tensione a circuito aperto)	36,6	V
Vmp(tensione alla max potenza)	29,05	V
Isc(corrente cortocircuito)	8,75	A
Imp(corrente alla max potenza)	8,1	A
potenza di picco Wp	235	W_p
specifiche tecniche		
numero celle e connessioni	60 (6x10)	
massimo voltaggio	1000	V
coefficiente di temperatura		
Coefficiente variazione corrente	0,071	%/ °C
Coefficiente variazione voltaggio	-0,337	%/ °C

tabella 39: caratteristiche tecniche dei moduli fotovoltaici

Il passaggio seguente serve a determinare i valori della tensione massima, minima e di esercizio per un modulo. Generalmente la tensione massima viene raggiunta in inverno con i moduli freddi e la tensione minima in estate con i moduli caldi. Allo scopo di determinare i valori di tensione del modulo occorre usare anche le altre indicazioni nel foglio dati del modulo fotovoltaico:

- Tensione V_{mp} e corrente I_{mp} nel punto di massima potenza (maximum power point = MPP);
- Tensione di circuito aperto V_{oc} a temperature estreme intorno ai -10°C .

I moduli fotovoltaico vengono collegati in serie per formare una stringa, la cui tensione di uscita sarà pari alla somma delle tensioni dei singoli moduli. le varie stringhe vengono poi collegate in parallelo e quindi inviate verso l'ingresso dell'inverter l'intervallo in cui può variare la tensione di esercizio all'ingresso dell'inverter determina il numero dei moduli fotovoltaico da connettere in serie per ogni stringa. La tensione massima in ingresso all'inverter viene raggiunta quando i moduli si trovano ad una temperatura di -10°C a circuito aperto (per esempio in freddissime giornate invernali quando il sole esce improvvisamente dopo essere stato oscurato dalle nuvole). Il numero di moduli fotovoltaici in serie deve essere scelto in modo che la tensione V_{oc} dei moduli non oltrepassi in nessun caso l'intervallo consentito per la tensione in ingresso dell'inverter (in caso contrario si rischia di danneggiare l'inverter).

4.2.6 Calcolo della tensione a -10°C e a $+70^{\circ}\text{C}$

La differenza di temperatura da usare per la moltiplicazione con il coefficiente di tensione si ricava dallo scarto con le condizioni standard (25°C):

$$V_{oc} (a -10) = V_{oc,STC} + (\beta \cdot (T - 25)) = 36,60 + (-0,145 \cdot (-35)) = 41,69 \text{ V}$$

$$V_{mp} (a -10) = V_m + (\beta' \cdot (-10 - 25)) = 29,05 + (-0,145 \cdot (-35)) = 34,14 \text{ V}$$

$$V_{mp} (a -70) = V_m + (\beta' \cdot (70 - 25)) = 29,05 + (-0,145 \cdot (45)) = 22,51 \text{ V}$$

La tensione più alta si verifica con V_{oc} a -10°C .

L'intervallo di variazione di potenza di un modulo nel punto di massima potenza è compreso tra 34,14 e 22,51 V.

4.2.7 Verifica configurazione generatore FV – Inverter

Dobbiamo considerare anche l'intervallo ammesso per la corrente in ingresso dell'inverter. In questo caso occorre fare attenzione alla corrente dei moduli nel punto di massima potenza MPP. Occorre cioè verificare se, con la configurazione di stringhe scelta, vengono rispettati gli intervalli di tensione e di corrente massima ammessa in ingresso dall'inverter.

Le 3 disuguaglianze di interfaccia, che se verificate ammettono la compatibilità tra generatore fotovoltaico e inverter, sono rappresentate dalle relazioni che seguono:

$$V_{oc,stringa}(T) = 41,69 \cdot 11 (n^{\circ}mod) = 458,58 \text{ V}$$

1) $V_{oc}(T_{min}) < V_{inv,max}$:

$$458,59 \text{ V} < 500 \text{ V}:$$

la verifica è andata a buon fine, nel senso che ipotizzando di installare un'unica stringa formata da 11 moduli, la tensione corrispondente totale data dalla somma delle singole tensioni non supera quella di ingresso dell'inverter.

$$V_{m,stringa}(T) = 34,14 \cdot 11 = 375,53 \text{ V}$$

2) $V_{mpp}(T_{min}) < V_{mppt max} = 400 \text{ V}$:

$$375,53 \text{ V} < 400 \text{ V}: \text{ la verifica è andata a buon fine.}$$

$$V_{m,stringa}(T) = 22,51 \cdot 11 = 247,58 \text{ V}$$

3) $V_{mpp}(T_{max}) > V_{mppt min} = 150 \text{ V}$

$$247,58 \text{ V} > 150 \text{ V}: \text{ la verifica è andata a buon fine.}$$

Dove appunto:

- $V_{oc}(T_{min})$ è la tensione massima della stringa a circuito aperto alla minima temperatura esterna;
- $V_{mpp}(T_{max})$ è la tensione di uscita del campo FV alla massima temperatura esterna
- $V_{mpp}(T_{min})$ è la tensione di uscita del campo FV alla minima temperatura esterna
- $V_{inv,max}$ è il massimo valore di tensione in corrente continua ammissibile ai morsetti dell'inverter
- $V_{mppt max}$ è il valore minimo della finestra di tensione utile alla ricerca della massima potenza dell'inverter

Definizioni per verifica osservanza condizioni di collaudo impianto FV (allegato 1 D.M. 19 febbraio 2007)

I moduli fotovoltaici devono essere provati e verificati da laboratori accreditati, per le specifiche prove necessarie alla verifica dei moduli, in conformità alla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025.

Gli impianti fotovoltaici devono essere realizzati con componenti che assicurino l'osservanza delle due seguenti condizioni:

a) $P_{cc} > 0,85 \cdot P_{nom} \cdot I/I_{stc}$

dove:

- P_{cc} è la potenza in corrente continua misurata all'uscita del generatore fotovoltaico, con precisione migliore del $\pm 2\%$;
- P_{nom} è la potenza nominale del generatore fotovoltaico;

I è l'irraggiamento [W/m^2] misurato sul piano dei moduli, con precisione migliore del $\pm 3\%$;

I_{stc} , pari a $1000 W/m^2$, è l'irraggiamento in condizioni di prova standard;

Tale condizione deve essere verificata per $I > 600 W/m^2$.

b) $P_{ca} > 0,9 \cdot P_{cc}$

dove:

P_{ca} è la potenza attiva in corrente alternata misurata all'uscita del gruppo di conversione della corrente generata dai moduli fotovoltaici continua in corrente alternata, con precisione migliore del 2% .

La misura della potenza P_{cc} e della potenza P_{ca} deve essere effettuata in condizioni di irraggiamento (I) sul piano dei moduli superiore a $600 W/m^2$.

Qualora nel corso di detta misura venga rilevata una temperatura di lavoro dei moduli, misurata sulla faccia posteriore dei medesimi, superiore a $40^\circ C$, è ammessa la correzione in temperatura della potenza stessa. In questo caso la condizione a) precedente diventa:

a) $P_{cc} > (1 - P_{tpv} \cdot 0,08) \cdot P_{nom} \cdot I/I_{stc}$

dove:

P_{tpv} indica le perdite termiche del generatore fotovoltaico (desunte dai fogli di dati dei moduli), mentre tutte le altre perdite del generatore stesso (ottiche, resistite, caduta sui diodi, difetti di accoppiamento) sono tipicamente assunte pari all' 8% .

Nota:

le perdite termiche del generatore fotovoltaico P_{tpv} , nota la temperatura delle celle fotovoltaiche T_{cel} , possono essere determinate da:

$$P_{tpv} = (T_{cel} - 25) \cdot \gamma / 100$$

oppure, nota la temperatura ambiente T_{amb} da:

$$P_{tpv} = [T_{amb} - 25 + (NOCT - 20) \cdot I / 800] \cdot \gamma / 100$$

dove:

γ è il coefficiente di temperatura di potenza (parametro, fornito dal costruttore, per moduli in silicio cristallino è tipicamente pari a $0,4-0,5 \%/^\circ C$).

NOCT è la temperatura nominale di lavoro

4.2.8 Conto energia e recupero investimento

Lo Scambio sul Posto 2009

Dal 1° Gennaio 2009 sono cambiate le regole di erogazione e di gestione dello Scambio sul Nuovo Scambio sul Posto 2009 Posto. Fino al 31 Dicembre 2008 lo Scambio sul Posto era un contratto stipulato dal cliente produttore (ovvero il possessore dell'impianto fotovoltaico) con il distributore locale (Enel, Acea etc...). Dal nuovo anno lo Scambio sul Posto è un contratto che si stipula con il Gestore dei Servizi Elettrici (GSE). Tutti i titolari di un contratto di

Scambio sul Posto con il distributore locale devono necessariamente passare sotto la gestione del GSE entro il 31-03-2009.

Con il nuovo anno è stata estesa questa possibilità di aderire al meccanismo di scambio sul posto anche agli impianti di potenza fino a 200 kW entrati in esercizio dopo il 31 dicembre 2007 (riportata dalla Delibera AEEG n.1/09 del 12/01/08, come previsto dalle leggi n. 222/07 e n. 244/07 e attuato dal decreto interministeriale del 18 dicembre 2008), ai quali si applicheranno le regole già in vigore dal 1° gennaio 2009 per gli impianti da fonti rinnovabili di potenza fino a 20 kW.

Come funziona il Nuovo Scambio Sul Posto

Il GSE compensa su base trimestrale tramite un rimborso monetario i consumi medi in energia elettrica (kWh) del produttore. Su base annua avverrà un conguaglio che, se da diritto ad un rimborso ulteriore, questo non viene estinto dopo 3 anni se non usufruito, come avveniva per il vecchio scambio sul posto. Il rimborso ulteriore viene comunque erogato sotto forma di compensazione di consumi di energia elettrica negli anni successivi. Entro 30 giorni successivi al trimestre di stipula della convenzione per lo Scambio sul posto (termine ultimo prorogato al 31 marzo 2009 per i vecchi produttori), Il GSE eroga un contributo di 50 € per kWp di potenza dell'impianto, al fine di evitare l'esposizione finanziaria causata dal pagamento delle prime bollette. Tale anticipo verrà successivamente riassorbito con gli acconti (trimestrali) e i conguagli (annuali) previsti dal GSE nell'ambito del meccanismo del nuovo scambio sul posto.

In aggiunta a tale incentivo il soggetto responsabile dell'impianto può contare su un ulteriore significativo vantaggio economico, utilizzando l'energia prodotta per:

1. la cessione in rete;
2. i propri autoconsumi (parzialmente o anche totalmente);
3. lo scambio sul posto con la rete elettrica (per i soli impianti di potenza fino a 20 kW).

I vantaggi economici relativi alle tre suddette modalità sono esplicitati nella seguente tabella relativo alla vendita dell'energia prodotta dall'impianto:

IMPIANTO FOTOVOLTAICO			
Potenza nominale impianto (kWp)	non integrato	parzialmente integrato	integrato
1 - 3	0,392 €	0,431 €	0,480 €
3 - 20	0,372 €	0,412 €	0,451 €
> 20	0,353 €	0,392 €	0,431 €

figura 20: tabella incentivi conto energia 2009

Si sottolinea che, contrariamente a quanto stabilito per il vecchio conto energia, per gli impianti fino a 20 kW che si avvalgano del servizio di scambio sul posto il nuovo decreto riconosce la tariffa incentivante alla totalità dell'energia elettrica prodotta (non solo a quella autoconsumata).

4.2.9 Valorizzazione dell'energia prodotta dall'impianto

Il conto energia costituisce la fonte di ricavo principale per il soggetto responsabile dell'impianto fotovoltaico poiché comporta l'erogazione di un incentivo proporzionale alla produzione di energia elettrica. Un'ulteriore fonte di ricavo per il soggetto responsabile è costituita dalla valorizzazione dell'energia elettrica prodotta dall'impianto che può essere poi autoconsumata (anche con il sistema dello scambio sul posto) oppure venduta al mercato. L'autoconsumo dell'energia prodotta costituisce una fonte di ricavo implicita, nel senso che costituisce un risparmio (riduzione della “bolletta” elettrica) in quanto consente di non acquistare dalla rete l'energia elettrica nella misura corrispondente all'energia autoconsumata. La vendita dell'energia elettrica prodotta e non autoconsumata costituisce invece una fonte di ricavo esplicita. La figura successiva evidenzia i flussi di energia elettrica scambiata con la rete nel caso di un impianto fotovoltaico connesso alla rete e con delle utenze elettriche che consumano energia.

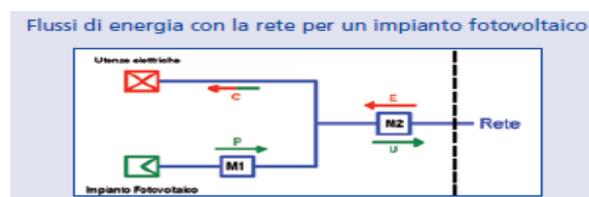


figura 21: flussi di energia elettrica scambiata con la rete nel caso di un impianto fotovoltaico connesso alla rete

dove:

P = energia prodotta dall'impianto fotovoltaico (energia incentivata)

E = energia prelevata dalla rete

U = energia prodotta dall'impianto fotovoltaico ed immessa in rete

C = energia consumata dalle utenze

M1 = contatore dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico

M2 = contatore di misura “bidirezionale” dell'energia scambiata con la rete

Bilancio energetico del sistema (riferito ad un determinato periodo temporale)

$$U - E = P - C$$

Nel caso del sistema elettrico costituito dall'impianto fotovoltaico connesso alla rete e con delle utenze che consumano energia è necessario disporre di 2 o 3 contatori. Il primo per la rilevazione e registrazione della misura relativa alla energia totale prodotta dall'impianto fotovoltaico (M1), ed un secondo contatore “bidirezionale” o doppio contatore (M2) per la rilevazione e registrazione delle misure relative alla energia scambiata (immessa e/o prelevata) con la rete alla quale l'impianto è collegato. Durante la notte oppure quando l'impianto fotovoltaico non è in produzione per altre motivazioni tutta l'energia consumata dalle utenze viene prelevata dalla rete $E = C$.

Quando l'impianto fotovoltaico è in produzione si possono verificare due casi:

- 1) $P > C$

in questo caso il saldo è positivo, ovvero trattasi di un prelievo della rete (cessione di energia alla rete);

2) $P < C$

in questo caso il saldo è negativo, ovvero trattasi di un prelievo dalla rete.

Definizione di contributo in conto scambio: ammontare che garantisce, al più, l'equivalenza tra quanto pagato dall'USSP, limitatamente all'energia elettrica prelevata, ed il valore dell'energia elettrica immessa in rete per il tramite del PdS[“*intervento equalizzatore*”]:

Il contributo in conto scambio è dato dalla sommatoria di due contributi, “*quota energia*” e “*quota servizi*”. Il contributo in “*quota energia*” permette, al più, il ristoro di quanto sostenuto dal cliente finale come onere in prelievo per la sola componente energia (OE) riferita al proprio contratto di fornitura. Il contributo in “*quota servizi*”, permette il ristoro dell'onere sostenuto dal cliente finale per l'utilizzo della rete (trasporto, misura, dispacciamento, oneri generali di sistema) per la totalità dell'energia elettrica scambiata con la rete Es. L'energia elettrica scambiata con la rete è uguale al minimo tra l'energia elettrica annualmente prelevata Ep e l'energia annualmente immessa in rete: $E_s = \min [E_i; E_p]$.

4.3 Recupero investimento

Di seguito verrà illustrata la procedura che permette di calcolare il recupero finanziario dell'impianto grazie all'incentivo del conto energia; in particolare si è progettato l'impianto in modo tale da avere a fine anno un surplus netto di energia che nel corso dello stesso anno è stata immessa in rete, cioè energia elettrica prodotta in più e non autoconsumata, che comporterà un'ulteriore ricavo la cui vendita al kWh sarà al prezzo di mercato:

Tabella riassuntiva:

analisi max produzione		
numero max moduli	10	
potenza max di picco	2350	W _p
superficie impianto	16,632	m ²
energia prodotta annuale	4169,01	kWh/anno
rendita	1774,04	kWh/anno/kWp

tabella 40: tabella riassuntiva delle caratteristiche dell'impianto

costo impianto = costo moduli + costo inverter + costi montaggio = $10 \cdot 1390 + 1813,90 + 600 = 16331$ euro + IVA (10%) = 17944,9 euro

costi aggiuntivi:

Costi aziendali			
Assicurazione	0,30%	€	41,70
Manutenzione	0,80%	€	111,20
		€	152,90

tabella 41: costi aziendali per impianto fotovoltaico

incentivi unitari:

GSE (tariffe incentivanti tabella)	0,431 €	a kWh
Net Metering (scambio sul posto)	0,180 €	a kWh

tabella 42: incentivi unitari per produzione impianto fotovoltaico

guadagni da conto energia:

energia immessa (differenza tra prodotta e autoconsumata)	1469,01	kWh/anno
guadagno da Net Metering (energia immessa * 0,180)	264,42	euro/anno
conto energia (kWh prodotti * 0,431)	1.796,84	euro/anno

tabella 43: guadagni da conto energia

Flusso di cassa:

anni	uscite			entrate		Cash - flow annuale - 17.944,90 €	accumulato
	rata	Costi	Totale				
1	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	1.908 €	
2	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	3.817 €	
3	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	5.725 €	
4	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	7.633 €	
5	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	9.542 €	
6	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	11.450 €	
7	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	13.359 €	
8	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	15.267 €	
9	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	17.175 €	
10	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	19.084 €	
11	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	20.992 €	
12	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	22.900 €	
13	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	24.809 €	
14	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	26.717 €	
15	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	28.625 €	
16	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	30.534 €	
17	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	32.442 €	
18	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	34.351 €	
19	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	36.259 €	
20	0 €	152.90 €	153 €	2.061 €	1.908 €	38.167 €	

tabella 44: flusso di cassa derivante dal conto energia

Guadagni da conto energia dopo venti anni = 38.167 €

4.3.1 Emissioni evitate

Di seguito si riporta la tabella dove si calcolano le emissioni evitate di CO₂, dovute al fatto di aver ricorso ad una fonte di energia rinnovabile che per definizione esclude l'immissione di gas serra in atmosfera quando produce energia per soddisfare i propri fabbisogni; emissioni da sottrarre a quelle di Centrale:

risparmio CO ₂	0,500	kg/kWh
Annuale: (risparmio CO ₂ · rendita kWh/anno/kWp · P _{imp})/1000	2,08	tonnellate
20 anni	41,69	tonnellate

tabella 45: risparmio di CO₂ di centrale conseguente alla produzione di energia derivante da fonte rinnovabile fotovoltaica

4.3.2 Calcolo del rendimento globale medio stagionale

L'impianto di riscaldamento e/o di produzione di acqua calda per usi igienico – sanitari è il sistema destinato a fornire energia termica all'edificio in quantità sufficiente ad assicurare, in un determinato periodo di tempo, il mantenimento di condizioni interne di temperatura prefissate e/o per produrre i quantitativi di acqua calda per usi igienico - sanitari richiesti.

L'energia primaria necessaria per produrre l'energia termica utile richiesta dall'edificio ai fini qui sopra indicati, è data dalla somma dell'energia termica utile richiesta dall'involucro edilizio, calcolata prescindendo dal comportamento del sistema di riscaldamento, e delle perdite di energia, calcolate in relazione al sistema di riscaldamento previsto o installato.

La norma tecnica UNI 10348 fornisce metodi e valori convenzionali per determinare il rendimento globale dei sistemi di riscaldamento e per il conseguente calcolo dei fabbisogni di energia primaria. Oltre alla UNI 10348 attualmente in vigore, esistono dei progetti di norma europea (prEN 15316-1, prEN 15316-2-1, prEN 15316-2-2, prEN 15316-2-3, prEN 15316-3) inerenti il calcolo dei rendimenti nei sistemi di riscaldamento e di produzione dell'acqua calda sanitaria. A quest'ultime facciamo riferimento nel calcolo del rendimento globale medio stagionale η_g :

$$\eta_g = \frac{E_p}{Q_h + Q_w}$$

dove:

E_p : energia primaria fornita al sistema;

Q_h : energia richiesta per il riscaldamento ambientale calcolata in accordo con la ISO EN 13790;

Q_w : energia richiesta per la produzione di acqua calda sanitaria.

In un dato periodo l'energia primaria fornita, E_p , per il riscaldamento ambientale e per l'acqua calda sanitaria, è data da:

$$E_p = \sum Q_{f,h} \cdot f_{p,i} + \sum W_h \cdot f_{p,i} + \sum Q_{f,w} \cdot f_{p,i} + \sum W_w \cdot f_{p,i}$$

dove:

$Q_{f,h}$: energia finale richiesta per il riscaldamento ambientale;

$f_{p,i}$: fattore di conversione in energia primaria per ogni tipo di energia utilizzata (es. termica, elettrica, solare, etc.);

W_h : energia ausiliaria necessaria per il riscaldamento ambientale;

$Q_{f,w}$: energia finale richiesta per la produzione di acqua calda sanitaria;

W_w : energia ausiliaria necessaria per la produzione d'acqua calda sanitaria.

$$E_p = (Q_{h,d} + Q_{acs} + Q_{biomassa}) = 247,11 \text{ kWh/anno} + 2846,004 \text{ kWh/anno} + 764 \text{ kWh/anno} = 3857,151 \text{ kWh/anno}$$

$$\eta_g = 3857/(247,11 + 2846) = 1,24$$

5 Confronto con un caso studio di un involucro tradizionale

C'è la necessità di confrontare le considerazioni fatte fin qui con un esempio di involucro tradizionale in cui si rinuncia a tutte quelle ipotesi iniziali di isolamento che hanno permesso di ottenere bassi valori di trasmittanza e di utilizzo delle rinnovabili; in particolare:

- pareti perimetrali sprovviste di isolamento a cappotto, e conseguente riduzione degli spessori;
- solai senza strati isolanti;
- tetto non isolato e conseguente riduzione dello spessore;
- infissi dotati di vetro singolo;
- caldaia tradizionale.

Adottando lo stesso metodo di calcolo per la casa oggetto dello studio, possiamo notare come aumenti sensibilmente la trasmittanza e conseguentemente la dispersione del calore per scambio termico; tutto ciò si tradurrà in un aumento del fabbisogno termico invernale, e considerando l'intervento non più del solare termico ma di una caldaia tipicamente tradizionale a gas noteremo come aumentino i costi annuali di energia.

5.1 Caratteristiche dei manufatti ed infissi casa tradizionale

pareti perimetrali:

N	descrizione strato (da interno ad esterno)	s m	lambda W/m K	C W/(m ² K)	R (m ² K)/W		
	adduttanza interna	0			0,142		
1	intonaco di calce e gesso	0,015	0,9	60	0,016		
2	mattoncino forato laterizio	0,2	0,292	1,46	0,684		
3	malta di calce E/O cemento	0,015	0,9	60	0,016		
	adduttanza esterna	0			0,05		
	totale	0,23			0,911	U	1,097

Solaio piano terra:

N	descrizione strato	s m	lambda W/m K	C W/(m ² K)	R (m ² K)/W		
	$\alpha_i=8$				0,13		
1	intonaco tradizionale	0,015	0,9		0,016		
2	tabelle forate	0,06	0	7,14	0,140		
3	massetto cls cellulare	0,05	1,16		0,043		
4	sabbia	0,02	0,6		0,033		
5	piastrella in ceramica	0,02	3		0,006		
	$\alpha_e=20$				0,05		
		0,165		Rtot	0,41	U	2,41

Tetto:

N	descrizione strato	s m	lambda W/m K	C W/(m ² K)	R (m ² K)/W	α_e
	resistenza termica superficiale esterna				0,043	23
1	tegola	0,01	0,99		0,010	
2	impermeabilizzante barriera al vapore in bitume	0,002	0,17	0,0034	0,011	
3	soletta in cls armato + tabelloni forati	0,2	1,16	7,14	0,312	
4	malta di gesso con inerti	0,02	0,29	60	0,068	
	resistenza termica				0,107	9,3

	superficiale interna					
		0,232			0,554	Ut=1,80

tabelle 46-47-48: caratteristiche manufatti di casa tradizionale

5.1.1 fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento casa tradizionale

soggiorno – vano scale	Q _{h,nd}	40,846	kW	147,047	kWh	35,2	m ²	4,177	kWh/m ²
cucina	Q _{h,nd}	15,027	kW	54,098	kWh	14,9	m ²	3,630	kWh/m ²
bagno1	Q _{h,nd}	6,806	kW	24,503	kWh	4,12	m ²	5,947	kWh/m ²
studio	Q _{h,nd}	29,914	kW	107,691	kWh	12	m ²	8,974	kWh/m ²
ingresso	Q _{h,nd}	10,108	kW	36,389	kWh	6,6	m ²	5,513	kWh/m ²
corridoio	Q _{h,nd}	29,692	kW	106,891	kWh	23,4	m ²	4,568	kWh/m ²
camera1	Q _{h,nd}	14,360	kW	51,696	kWh	16,13	m ²	3,204	kWh/m ²
camera2	Q _{h,nd}	13,544	kW	48,759	kWh	11,28	m ²	4,322	kWh/m ²
camera3	Q _{h,nd}	18,542	kW	66,751	kWh	11,5	m ²	5,804	kWh/m ²
bagno2	Q _{h,nd}	11,770	kW	42,372	kWh	9,6	m ²	4,413	kWh/m ²
totale anno casa	Q _{h,nd}	190,612	kW	686,203	kWh	144,73	m ²	50,557	kWh/m ²

tabella 49: fabbisogno ideale energia termica per riscaldamento nel caso tradizionale

5.1.2 Confronto costi tradizionale e casa passiva

Nel paragrafo che segue si farà un confronto tra i costi che bisognerà supportare nella casa oggetto del nostro studio e i costi che sarebbero previsti in una ipotetica casa convenzionale in cui non si ricorre a nessuna tecnologia impiantistica adottata fin qui, ovvero tecnologie a fonte rinnovabile, ed in cui si considerano i costi di fornitura di energia di gas ed energia elettrica. Inoltre, nel caso della casa a basso impatto energetico e in cui si è scelto di ricorrere all'isolamento a cappotto, a speciali vetro camera, e alla soluzioni impiantistiche viste fin qui, si farà un'analisi dei costi e del recupero dell'investimento iniziale, per valutare la bontà in termini economici del progetto; in questo modo capiremo se il ricorso al cosiddetto risparmio energetico promosso in questi anni specialmente, risulterà vantaggioso durante la vita utile della casa, ovvero se sarà possibile ammortizzare l'investimento iniziale sia con i risparmi indotti dal ricorso all'efficienza energetica della casa, oggetto del nostro studio, sia col ricorso ai finanziamenti ed incentivi promossi dallo Stato. In primo luogo, si è ipotizzato un costo di costruzione fisso identico che occorrerà affrontare sia nel caso di edificio convenzionale e sia nel caso della casa oggetto dello studio. Successivamente, si indicheranno i costi da affrontare nel caso tradizionale per gli apporti di energia da fonti convenzionali e considerandoli fissi, si calcolerà quanto spenderei nell'arco dei venti anni, intervallo di tempo scelto per la nostra analisi. Infine, si calcoleranno i costi iniziali, aggiuntivi, previsti nella casa passiva ed in quanto tempo riusciremo ad ammortizzarli.

casa tradizionale:

costo dei consumi tradizionale			
anni	metano	elettricità	costo totale
1	880	513	1393
2	880	513	1393
3	880	513	1393

4	880	513	1393
5	880	513	1393
6	880	513	1393
7	880	513	1393
8	880	513	1393
9	880	513	1393
10	880	513	1393
11	880	513	1393
12	880	513	1393
13	880	513	1393
14	880	513	1393
15	880	513	1393
16	880	513	1393
17	880	513	1393
18	880	513	1393
19	880	513	1393
20	880	513	1393
totale	17600	10260	27860

Tradizionale		
costi costruzione	100000	euro
consumi elettrici	2700	kWh/anno
costo energia elettrica	513	euro/anno
costo metano	880	euro/anno

tabella 50 e 51: costo dei consumi per riscaldamento e di energia elettrica casa tradizionale

Costi casa passiva:

tabella
tabella

MANUFATTI					
componenti	tipologia	euro al m ²	spessori in m	superficie	costo complessivo
pareti perimetrali	lana di roccia	17,33	0,1	229,32	3974,11
INFISSI					
vetro camera	triplo-vetro	250		33,06	8265
IMPIANTI					
fotovoltaico	policristallino	17944,9			
solare termico	tubi sotto vuoto	4526,1			
INVESTIMENTO INIZIALE					32220,76

52:

riassuntiva delle componenti impiegate nella casa oggetto dello studio, isolanti, infissi e impianti.

	ricavi fotovoltaico	risparmi elettricità	recupero finanziario da risparmio energetico
anni			
1	-16036,53	513	-13395,86
2	-14128,16	513	-12515,86
3	-12219,80	513	-11635,86
4	-10311,43	513	-10755,86
5	-8403,07	513	-9875,86
6	-6494,70	513	-8995,86
7	-4586,34	513	-8115,86
8	-2677,97	513	-7235,86
9	-769,61	513	-6355,86
10	1138,75	513	-5475,86
11	3047,11	513	-4595,86
12	4955,48	513	-3715,86
13	6863,84	513	-2835,86
14	8772,21	513	-1955,86
15	10680,58	513	-1075,86
16	12588,94	513	-195,86
17	14497,31	513	684,13
18	16405,67	513	1564,13
19	18314,04	513	2444,13
20	20222,40	513	3324,13
totale	20222,40	10260	4204,13

Passiva	
costi costruzione	100000
costi impianti	32220,76
costo energia elettrica	0
costo metano	0
isolamento	-3974,11
infissi	-8265
solare-termico	-2036,74
fotovoltaico	-17944,9

tabella 52: schema di ammortamento dell'impianto FV, dei risparmi ottenibili con tale soluzione, e del recupero finanziario che si otterrebbe con l'impianto solare termico + biomassa considerandone solo i risparmi in bolletta

Di seguito riporto due grafici che illustrano come avviene nel tempo il recupero finanziario dell'impianto fotovoltaico con il conto energia e il consumo che si verifica nel caso tradizionale:

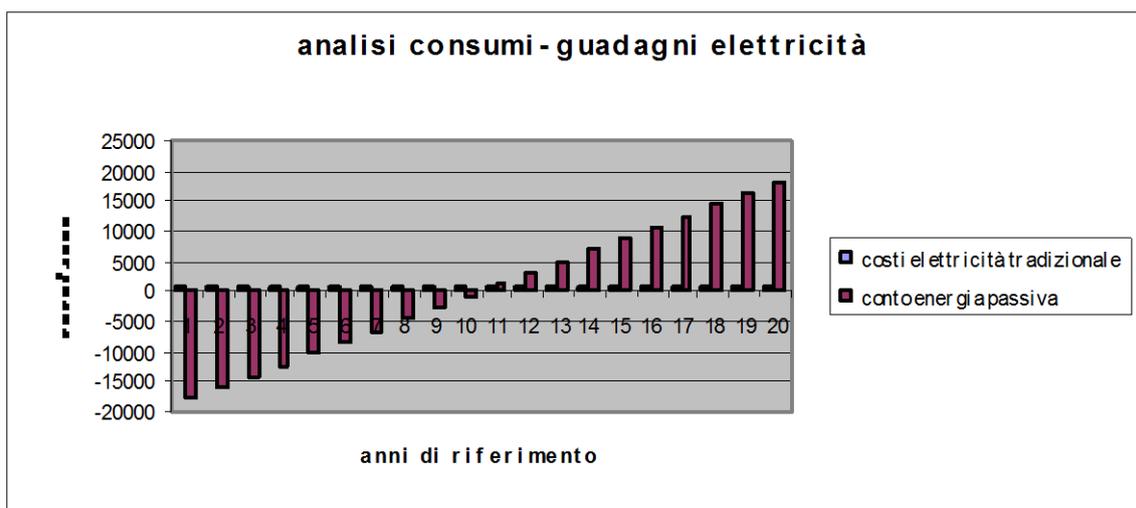


grafico 4: analisi dei consumi – guadagni da conto energia

Di seguito si riporta il grafico che indica il costo tradizionale per fornitura di gas combustibile e l'ammortamento nel caso di costruzione passiva dei costi iniziali da sostenere per l'isolamento e le soluzioni impiantistiche viste finora per il fabbisogno termico dell'edificio:

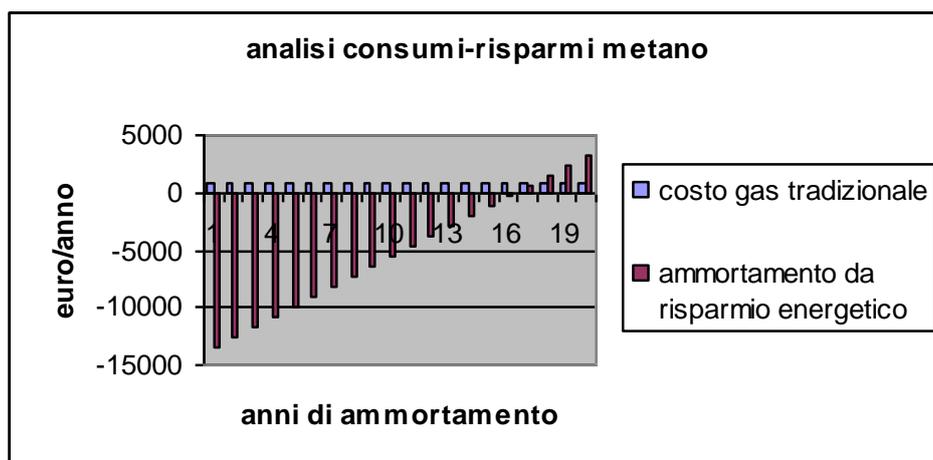


grafico 5: analisi consumi – risparmi metano

Conclusioni

I risultati che si sono ottenuti in questa tesi dimostrano l'effettivo ritorno economico degli investimenti fatti per risparmio energetico nel campo residenziale; si è infatti trovato che a fronte di una maggiore spesa iniziale su impianti e caratteristiche edilizie si ha un guadagno proveniente dal notevole risparmio sui consumi.

Si è visto che l'incremento di costo iniziale di una casa passiva rispetto ad una tradizionale si aggira intorno al 30 % considerando un esempio di casa unifamiliare con le medesime caratteristiche strutturali e volumetriche; parallelamente si è però calcolato che nell'arco di 17 anni la spesa energetica della casa tradizionale raggiunge il valore dell'investimento fatto per ottenere una casa di tipo passivo.

La scelta quindi di ricorrere ai sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabile e di massimizzare il risparmio energetico è premiata nel tempo in quanto fornisce oltre che un guadagno di tipo economico uno , altrettanto importante, di tipo ambientale, relativo alle mancate emissioni di CO₂ nell'ambiente.

Parallelamente alla scelta iniziale di investimento si dovrà prestare perciò molta cura anche al risparmio energetico e alla limitazione degli sprechi.

Concludendo, la speranza è quella che in un futuro prossimo si possa diffondere sempre di più la sensibilità ecologica nel costruire; ma è pur vero che è necessario ricorrere in massa a scelte di questo tipo promuovendo su scala nazionale sempre più politiche che favoriscano ed incentivino la scelta di ricorrere alle soluzioni impiantistiche viste ed affrontate in questo lavoro di tesi.

BIBLIOGRAFIA

- Agnese Aghini, Valutazione dell'efficienza energetica di sistemi di involucro in laterizio Bologna Clueb, 2006
- Uwe Wienke, L'edificio passivo, Alinea editrice, 2002

- Annalisa Corrado, Riccardo Battisti, Andrea Micangeli, Impianti solari termici-acqua calda con l'energia sanitaria, Franco Muzzio editore, 2005
- Gianfranco Rizzo, Marco Filippi, Certificazione energetica e verifica ambientale degli edifici, Dario Flaccovio Editore, 2007
- Karl-Heinz Remmers, Christian Durschner, Falk Antony, Il fotovoltaico per professionisti: vendita, progettazione e montaggio di impianti fotovoltaici, Dena-agenzia tedesca per l'Energia, 2007