



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

Corso di Laurea

RISCHIO AMBIENTALE E PROTEZIONE CIVILE

Analisi energetico-ambientale nell'uso di un modulo fotovoltaico trasportabile per scopi di Protezione Civile

Energetic and environmental impact analysis applied to a transportable photovoltaic module for Civil Protection purposes

Tesi di Laurea di:
Martina Mattucci

Docente Referente:
Prof. Ing. Paolo Principi

Sessione: Estiva

Anno Accademico: 2019/2020

Indice:

Introduzione.....	1
Capitolo 1: Il Fotovoltaico.....	5
1.1 Tipi di celle fotovoltaiche.....	7
1.2 Principio di funzionamento del modulo fotovoltaico.....	10
1.3 Rendimento dell'impianto fotovoltaico.....	13
Capitolo 2: Pompa di calore.....	16
2.1 Principio di funzionamento.....	17
2.2 Il ciclo di Carnot.....	22
2.3 Il ciclo frigorifero.....	24
2.4 Ciclo frigorifero a compressione di vapore.....	27
2.4.1 Descrizione del ciclo frigorifero a compressione di vapore ideale.....	29
2.4.2 Descrizione del ciclo frigorifero a compressione di vapore delle macchine reali.....	31
Capitolo 3: Apparecchiature:	
3.1 generatore fotovoltaico (i-kube)	33
3.2 tenda.....	40
3.3 container.....	48
3.4 Climatizzatore portatile a pompa di calore.....	54
3.5 Radiatore elettrico ad olio.....	56
3.6 Attività svolte.....	57
Capitolo 4: Analisi teorica	
4.1 Calcolo dei carichi termici estivi.....	61
4.2 Calcolo delle dispersioni termiche invernale.....	62
4.3 Metodi utilizzati per calcolare e quantificare le emissioni di CO ₂	75

4.4 Calcolo della potenza installata.....	78
4.5 Calcolo dell'autonomia del sistema I-Kube.....	80
4.6 calcolo del COP della pompa di calore e del dispendio energetico giornaliero e mensile	82
Capitolo 5: Fase sperimentale	
5.1 Funzionamento del sistema cubo.....	84
5.2 Simulazione.....	90
Conclusioni	92
Bibliografia.....	94

Introduzione

La situazione energetica mondiale è ormai da qualche anno un serio problema che preoccupa l'intero pianeta. La sempre maggiore richiesta di energia, l'inquinamento prodotto dalle centrali, responsabile degli stravolgimenti climatici dei nostri giorni e il relativo impatto ambientale, fanno sì che la ricerca nel campo della generazione energetica con "fonti alternative" rispetto a quelle tradizionali sia notevolmente in crescita. In questo contesto la fonte di energia più nobile ed inesauribile è l'energia che proviene dal Sole. In questo contesto la tecnologia del Fotovoltaico è una tra le principali ed importanti tecnologie che sfruttano la radiazione solare, trasformandola in energia elettrica, senza effetti negativi sull'ambiente. A differenza dei combustibili fossili e nucleari, destinati ad esaurirsi in un tempo finito, queste forme di energia possono essere considerate virtualmente inesauribili. Molteplici sono le applicazioni del fotovoltaico: dai piccoli e semplici fabbisogni del singolo utente, ai grandi sistemi per comunità ed usi commerciali. In effetti questi sistemi possono essere forniti per vari livelli di potenza, voltaggio, grandezza, a seconda del fabbisogno. In genere le tipologie di impianti fotovoltaici che si riscontrano nel mercato sono:

- grid connected: sono impianti connessi alla rete elettrica nazionale i quali hanno elevate superfici di captazione della radiazione solare;
- stand alone: in questo secondo caso l'impianto non è connesso alla rete elettrica nazionale, ma alimenta singoli fabbisogni e l'energia elettrica prodotta dal campo fotovoltaico viene immagazzinata in batterie di accumulo;

- storage: è un impianto “ibrido” che coniuga le caratteristiche di quelli precedenti.

Uno stato di emergenza è quello che si individua nelle attività antropiche quando una si manifesta una variazione improvvisa, ma limitata nel tempo delle condizioni di vita di una popolazione che determina negli individui una condizione di instabilità che si diversifica dall'equilibrio di uno stato di normalità. Un evento calamitoso rappresenta un elemento di discontinuità del processo di evoluzione umana e per questo viene inquadrato e considerato nella propria evoluzione, costituito temporalmente da un prima, un durante e un dopo, che impongono una gestione delle emergenze (Disaster Management) che sia in grado di sviluppare tanto una cultura del soccorso quanto una progettualità in grado di definire in maniera scientifica i modi e le forme di intervento, secondo una visione complessiva del fenomeno.

Il Disaster Management risponde, in situazioni di emergenza, all'immediata necessità di dare una provvisoria sistemazione alla popolazione colpita e alle funzioni strategiche, sanitarie e produttive di prima necessità, infatti gli insediamenti temporanei sono una risorsa indispensabile quando si verificano eventi calamitosi che comportano un rischio elevato per la vita umana e per la perdita del tessuto edilizio, conseguenti a fenomeni naturali o per azione dell'uomo. La definizione dei campi di accoglienza è riconducibile alla fase di preparazione, in cui viene operata l'analisi dei rischi per la conoscenza della vulnerabilità, e come tale intende proporre uno strumento costruito in condizioni ordinarie per ottimizzare la risposta a un possibile evento calamitoso.

In Italia il Disaster Management e la progettazione degli insediamenti per l'emergenza sono affidati dal 1992, alla Protezione Civile (L. n. 225/1992).

Quando si realizza un insediamento, a seguito di evento calamitoso, potrebbero essere difficilmente accessibili o non utilizzabili le reti elettriche per l'alimentazione energetica delle tende o dei moduli abitativi dei campi di accoglienza o degli ospedali da campo. Per questo vengono quasi sempre utilizzati i generatori elettrici che si alimentano a combustibile fossile liquido i quali, durante il loro funzionamento emettono sostanze volatili e polveri inquinanti che possono ledere la salute degli occupanti.

Per questo la Protezione Civile sta adottando impianti mobili di produzione di energia elettrica attraverso lo sfruttamento delle energie rinnovabili tra le quali il sole e tra questi piccole unità trasportabili fotovoltaiche con accumulo di energia.

Con la tesi si è voluto valutare il comportamento energetico-ambientale di un sistema fotovoltaico trasportabile, di tipo commerciale, per la produzione di energia elettrica.

La valutazione è stata effettuata considerando il sistema come alimentatore elettrico per la climatizzazione di una tenda e, in alternativa, di un container ad uso abitativo i cui rispettivi modelli rientrano nella categoria dei materiali adottati dalla Protezione Civile per la realizzazione dei campi di accoglienza.

Lo studio ha voluto, in particolar modo, valutare i risparmi di energia elettrica e, di conseguenza, di CO₂ immessa in atmosfera, conseguibile con l'uso del sistema fotovoltaico in un periodo di tempo caratterizzato dalle condizioni ambientali riscontrabili durante le quattro stagioni dell'anno. Infatti, i calcoli teorici hanno

riguardato cinque mesi che vanno da Febbraio a Giugno compresi, avendo così dati climatici di input che riguardano Inverno, estate e stagioni intermedie.

Per validare i calcoli numerici è stato adottato anche un approccio sperimentale attraverso l'uso di materiali messi a disposizione dalla Protezione Civile delle Marche quali un generatore fotovoltaico mobile da 1400 WP, una tenda per l'accoglienza di otto persone e due sistemi alternativi di climatizzazione quali un radiatore ad olio, per il riscaldamento invernale ed una pompa di calore ad inversione di ciclo per il riscaldamento invernale ed il raffrescamento estivo.

In questo modo si è anche voluto vedere come i diversi rendimenti di generazione termica dei due sistemi di climatizzazione possano influire in maniera diversa sul consumo di energia elettrica e quindi di emissione di gas climalterante.

Capitolo 1: Il Fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico (Photovoltaic, PV) è un impianto che converte direttamente l'energia solare in energia elettrica.

È una tecnologia oramai ampiamente diffusa e caratterizzata da modularità, semplicità, affidabilità e ridotta manutenzione.

Gli elementi principali costituenti un impianto fotovoltaico sono:

- pannelli o moduli fotovoltaici;
- una struttura di sostegno per collocare i moduli sul terreno, in corrispondenza di un edificio (tetto, facciata, terrazzo, ecc.) o su di una qualsiasi struttura edilizia;
- inverter, che converte la corrente continua disponibile dai pannelli fotovoltaici in corrente alternata;
- i quadri elettrici e i cavi di collegamento.

Gli impianti fotovoltaici vengono solitamente connessi alla rete elettrica di distribuzione, oppure possono servire utenze isolate (stand alone), per assicurare l'energia elettrica in zone non collegate o difficilmente collegabili alla rete di distribuzione; in questa seconda configurazione viene sfruttata direttamente sul posto l'energia elettrica prodotta e accumulata in un accumulatore di energia elettrica (batterie).

L'impianto fotovoltaico avrà prestazioni dipendenti dalla corretta esposizione all'irraggiamento solare dei moduli fotovoltaici. La scelta in relazione alla fattibilità tecnica si fonda sull'esistenza nel sito d'installazione delle seguenti caratteristiche, che devono essere verificate dal progettista/installatore in sede di sopralluogo:

disponibilità dello spazio necessario per installare i moduli (occorre una superficie netta di circa $7\div 10$ m² per ogni kW di potenza di picco, se i moduli sono installati in maniera complanare alle superfici di pertinenza dell'edificio; occorre uno spazio maggiore se l'impianto è installato in più file successive su strutture inclinate e collocate su superfici piane per evitare ombreggiamenti fra file vicine); corretta esposizione e inclinazione dei moduli; le condizioni ottimali per l'Italia sono:

- esposizione sud (accettata anche sud-est, sud-ovest, con limitata perdita di produzione);
- inclinazione 30-35 gradi da valutare in base alla latitudine;
- assenza di ostacoli in grado di creare ombreggiamento.
- La producibilità elettrica media annua di un impianto fotovoltaico può essere preventivamente valutata attraverso un calcolo che considera:
- la radiazione solare annuale del sito (determinabile ricorrendo a banche dati: UNI 10349, Atlante Solare Europeo, ENEA);
- un fattore di correzione computato basandosi sull'orientamento, sull'angolo d'inclinazione dei moduli fotovoltaici e sui possibili ombreggiamenti locali;

- l'efficienza di conversione energetica dei moduli fotovoltaici, dell'inverter e degli altri componenti dell'impianto;
- le condizioni ambientali di riferimento del sito nelle quali devono operare i moduli fotovoltaici (ad esempio con l'aumento della temperatura di funzionamento dei moduli diminuisce l'energia prodotta dall'impianto).

1.1 Tipi di celle fotovoltaiche

Circa il 90% del mercato fotovoltaico è costituito da celle in silicio cristallino (mono e policristallino rispettivamente mostrate in Figura 1.1 e in Figura 1.2); il resto si divide in celle a film sottile o destinate a tecnologie particolari. Il silicio viene purificato e fuso per formare un lingotto, che viene tagliato in strati sottili, dell'ordine del centinaio di micron. Segue il drogaggio del silicio per formare la giunzione P-N, si applicano i contatti elettrici sulle superfici e si tratta la superficie anteriore con materiale antiriflettente. I rendimenti elettrici delle celle al silicio monocristallino raggiungono il 21%; esse sono molto costose da produrre per il complesso processo di produzione, invece i rendimenti di quelle policristalline sono variabili tra 15-18% ma hanno un prezzo minore. Le celle in silicio cristallino sfruttano solo l'aliquota di radiazione diretta.



Figura 1.1: Cella in silicio monocristallino.

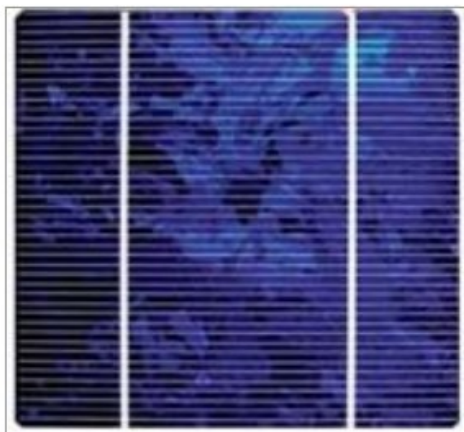


Figura 1.2: Cella in silicio policristallino.

Le celle a film sottile (Figura 1.3) usano semiconduttori particolari, come il CdTe (tellururo di cadmio), il CIS (solfuro di indio e rame), il CIGS (solfuro di rame, indio e gallio) o, quasi sempre, il silicio amorfo, in grado di sfruttare oltre alla radiazione diretta anche quella riflessa e quella diffusa; contrariamente hanno rendimenti molto bassi, intorno al 5-8%. Uno strato semiconduttore di pochi micron viene posto, mediante processi fisici e chimici, su di una superficie di supporto, da cui il nome di

celle a “film sottile” per differenziarle dalle celle a silicio cristallino aventi uno spessore di centinaia di micron. Ciò accade perché il silicio amorfo ha un coefficiente di assorbimento circa 40 volte maggiore al silicio cristallino e il risparmio di materiale semiconduttore è elevato per cui rappresenta la tecnologia meno costosa. Il supporto può essere anche flessibile e questo amplia il campo di applicazione delle celle a film sottile adattandosi bene a tipici profili con cui si realizza l’impianto.



Figura 1.3: Cella a film sottile.

Per produrre, quindi, una cella a film sottile rispetto ad una cella di silicio cristallino c’è bisogno di meno energia. Le celle a film sottile non superano il 10% del mercato perché offrono prestazioni inferiori e variabili nel tempo, e i processi produttivi non sono ancora ottimizzati. Si prevede, nel vicino futuro, un livello di espansione maggiore per le celle a film sottile in relazione a un grande margine di riduzione dei costi di produzione.

1.2 Principio di funzionamento del modulo fotovoltaico

I semiconduttori, generalmente utilizzati nella componentistica elettronica, rappresentano i materiali impiegati nelle celle fotovoltaiche. L'elemento fondamentale per le celle fotovoltaiche più diffuse è il silicio, semiconduttore di gran lunga più noto. Nei materiali isolanti, gli elettroni di valenza non si possono allontanare dall'atomo; sono cioè bloccati nella banda di valenza e non possono passare nella banda di conduzione.

Nei materiali conduttori (metallici), gli elettroni di valenza sono liberi di muoversi e il loro movimento, provocato da un campo elettrico, dà origine alla corrente elettrica. In questo caso, le bande di valenza e di conduzione sono sovrapposte. Nei materiali semiconduttori, gli elettroni di valenza non si possono spostare, come nei materiali isolanti, ma è piccola la differenza energetica tra la banda di valenza e quella di conduzione, pertanto gli elettroni possono passare con facilità nella banda di conduzione, ma soltanto se ricevono energia dall'esterno. La radiazione elettromagnetica fornisce l'energia necessaria all'elettrone di un semiconduttore per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione (effetto fotoelettrico). Però solamente i fotoni aventi il livello energetico di banda sono in grado di liberare gli elettroni dalle bande in cui sono vincolati nell'atomo (di valenza) a quelle di conduzione. Grazie all'effetto fotoelettrico un semiconduttore diventa conduttore, ma non per questo diviene un generatore elettrico. Un generatore elettrico è ottenuto ricorrendo a una giunzione P-N. Per capire in modo migliore il funzionamento di una cella fotovoltaica è utile annoverare, anche se in maniera semplificata, il concetto fisico

di una giunzione P-N. Se nel silicio, che ha quattro elettroni di valenza, si inseriscono atomi di fosforo, i quali hanno cinque elettroni di valenza, si rende fruibile un elettrone di conduzione. Nel silicio si formano quindi un eccesso di cariche negative (elettroni); per cui si dice che il silicio è drogato negativamente (N). Se si droga il silicio con una sostanza che ha tre elettroni di valenza, ad esempio il boro, viene a mancare un elettrone e tale mancanza di carica elettrica negativa si chiama lacuna. Si dice che il semiconduttore è drogato positivamente (P) poiché tutto accade come se fosse disponibile una carica positiva. Se un semiconduttore P viene a contatto con un semiconduttore N, si forma la giunzione P-N. La regione tipo N ha un eccesso di elettroni, la regione tipo P ha un eccesso di lacune. Gli elettroni, nella giunzione P-N, tendono a diffondersi naturalmente dalla regione ad alta densità di elettroni (lato N) alla regione a bassa densità di elettroni (lato P), creando in tal modo un accumulo di carica negativa nella regione P. Un fenomeno simmetrico avviene per le lacune, con un accumulo di carica positiva nella regione N. Infine, in prossimità della giunzione si stabilisce un campo elettrico interno alla giunzione, che si oppone alla ulteriore naturale diffusione delle cariche una volta raggiunta una condizione di equilibrio. Se si applica dall'esterno una tensione U , la giunzione permette il passaggio di corrente in un senso solo, funzionando cioè da diodo. Se ora la giunzione P-N viene investita dalla radiazione luminosa, la situazione cambia radicalmente, perché la radiazione luminosa fornisce agli elettroni l'energia sufficiente per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione; l'elettrone passando nella banda di conduzione determina una lacuna. Le cariche elettriche sono messe in movimento dalla differenza di potenziale presente

nella giunzione P-N. Ecco pertanto il generatore fotovoltaico: la tensione dovuta alla giunzione P-N mette in movimento le cariche elettriche (corrente) prodotte nel semiconduttore dall'effetto fotoelettrico, rappresentato in Figura 1.4

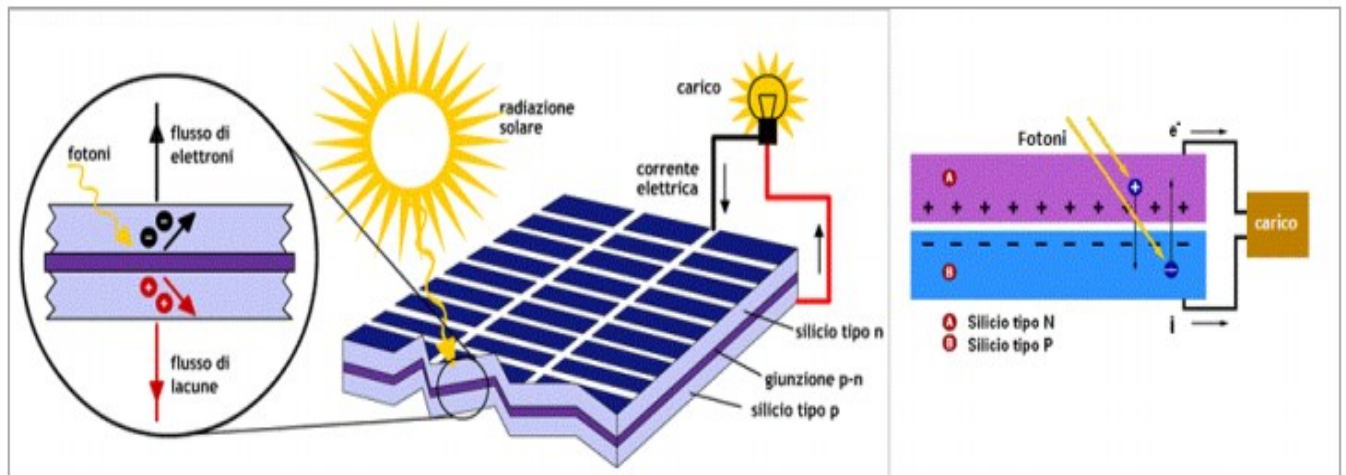


Figura 1.4: Rappresentazione di un generatore fotovoltaico.

La cella fotovoltaica non è altro che una giunzione P-N di silicio. La zona di silicio circostante la giunzione P-N è quella che contribuisce a fornire la corrente; nelle zone lontane si formano le cariche elettriche, ma poiché manca il campo elettrico che le mette in movimento, in gran parte si ricombinano. Da qui deriva il rilievo che la cella fotovoltaica abbia una elevata superficie: maggiore è la superficie e maggiore è la corrente elettrica disponibile.

1.3 Rendimento dell'impianto fotovoltaico

La produzione di energia elettrica fin qui indicata è al lordo delle perdite all'interno del campo fotovoltaico (lato DC) e nella parte AC (corrente alternata, e cioè il resto dell'impianto). Le perdite nel campo fotovoltaico sono dovute principalmente a:

- temperatura delle celle superiore a quella nominale;
- eventuali ombreggiamenti;
- riflessione della radiazione solare sulla superficie dei moduli;
- accumulo di sporcizia sulla superficie dei moduli;
- naturale affaticamento dei materiali;
- dissimmetrie (mismatch);
- effetto Joule nei cavi e nelle apparecchiature elettriche.

La potenza nominale di un modulo è attribuita alla massima potenza in condizioni di prova standard (irraggiamento 1000 W/m^2 ; temperatura delle celle $25 \text{ }^\circ\text{C}$; distribuzione spettrale con air mass $AM = 1,5$). La radiazione solare consente di valutare l'energia elettrica che il modulo può fornire in un determinato intervallo di tempo, in condizioni di irraggiamento variabile e diverso da quello standard. Va considerato però che la potenza cambia anche con la temperatura delle celle, in genere superiore al valore standard di 25°C . La temperatura delle celle cambia durante le ore del giorno e da un giorno all'altro, allora per calcolare l'incidenza della temperatura sull'energia prodotta in un anno occorrerebbe rilevare, o ipotizzare, l'andamento della temperatura delle

celle durante un giorno tipico del mese e poi utilizzare programmi appositi per valutare la produzione di energia elettrica in un anno.

Da questi algoritmi complessi scaturisce che, se si fa riferimento a moduli in silicio cristallino, la perdita di energia per effetto della temperatura varia dal 6% (zone fredde) all'11% (zone molto calde) e eccetto casi particolari si può assumere una perdita dell'8%. Ciò nell'ipotesi che l'installazione permetta la ventilazione sul retro dei moduli. Nel caso di moduli integrati nella struttura edilizia, dove non è possibile assicurare un'adeguata ventilazione alla superficie posteriore degli stessi, la perdita media può essere stimata in circa il 12% con valori che possono superare il 15% in località molto calde. L'ombra riduce la produzione di energia elettrica in quanto diminuisce la radiazione solare sul modulo e aumenta le perdite di mismatch. In un impianto ben progettato ed installato, l'entità delle perdite nel campo fotovoltaico cambia dal 10% al 15% della energia elettrica prodotta. Le perdite legate al campo fotovoltaico possono generalmente essere stimate nel seguente modo:

- perdite dovute all'effetto della temperatura: 7%;
- perdite dovute a dissimmetrie nelle prestazioni: 3%;
- perdite per ombreggiamento e bassa radiazione: 2%;
- perdite per riflessione: 2%;
- perdite nei circuiti in corrente continua: 1%.

Le restanti perdite dell'impianto derivano dalle perdite sul lato AC e cioè quelle collegate sostanzialmente alla presenza dell'inverter, del possibile trasformatore e dei cavi e degli altri componenti elettrici quali ad esempio i misuratori dell'energia elettrica, valutabili intorno al 5%÷10%. Inoltre va presa in considerazione la riduzione delle prestazioni di un modulo fotovoltaico di circa l'1% su base annua a causa dell'invecchiamento, e gli assorbimenti degli eventuali dispositivi per l'inseguimento solare e le batterie di accumulo se l'utenza è isolata o si intende aumentare l'autoconsumo di energia elettrica.

Capitolo 2: La pompa di calore

La pompa di calore è un dispositivo meccanico in grado di trasferire il calore estratto da una sorgente a bassa temperatura (sorgente fredda), verso un ambiente a temperatura più alta (pozzo caldo). La peculiarità della macchina consiste quindi nella capacità di forzare il flusso di calore nella direzione contraria rispetto a quello che è definito il flusso naturale. Tuttavia, il Secondo Principio della Termodinamica non è violato perché la pompa di calore effettua il trasferimento forzato di calore utilizzando lavoro fornito dall'esterno.

Si tratta di una *Pompa di calore* che si basa sul principio di Carnot enunciato da Lord Kelvin in una sua relazione alla Philosophical Society di Glasgow nel 1852, nella quale si prevedeva di utilizzare una macchina per raffreddare e riscaldare un ambiente.

La pompa di calore potrebbe essere applicata su vastissima scala sia per la produzione di acqua calda sia, e soprattutto, per la climatizzazione degli ambienti, come del resto accade diffusamente in Giappone, negli Stati Uniti e nei Paesi del Nord Europa, utilizzando fonti di energia largamente disponibili in natura quali aria esterna, acqua di falda, fiumi, calore diffuso nel terreno, ovvero energia solare oppure sfridi di calore da processi produttivi industriali.

Un processo di recupero energetico di tal genere è altamente remunerativo poiché la quantità di energia che si riesce a recuperare dai fluidi gratuiti (aria, acqua, terra...) è

assai superiore (circa 3 - 3,5 volte) al lavoro meccanico svolto dal compressore, ovvero all'energia elettrica spesa per farlo funzionare.

2.1 Principio di funzionamento

Una pompa di calore si compone essenzialmente di un circuito sigillato nel quale un gas, normalmente Freon R22, compie un intero ciclo termodinamico (Fig.2.1).

Di seguito evidenziamo quali sono le fasi più importanti del ciclo:

- nella fase di compressione il freon (stato gassoso) assorbe ulteriore calore per conversione di lavoro meccanico-termico;
- nella fase di condensazione il freon cede il calore assorbito nelle due fasi precedenti, all'acqua o all'aria esterne;
- nella fase di espansione il freon riduce la propria pressione e temperatura (stato liquido);
- nella fase di evaporazione il freon assorbe calore sottraendolo all'aria o ad altro mezzo.

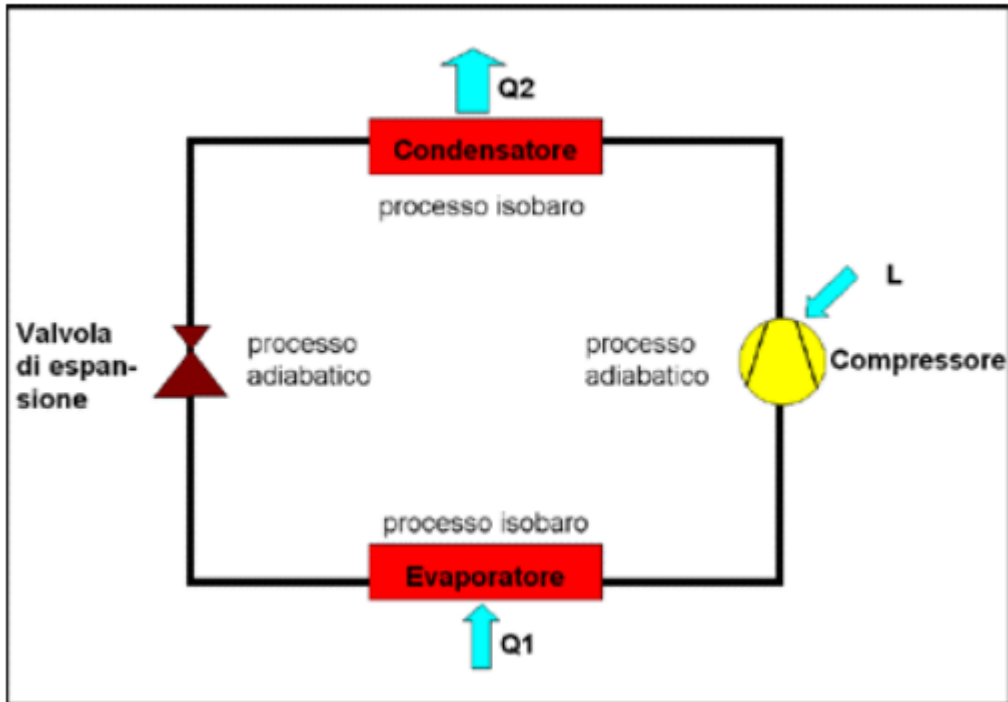


Fig 2.1: Schema di circuito della pompa di calore

Il rapporto tra la quantità di calore ceduto nel condensatore e quantità di calore spesa in lavoro meccanico, ovvero quantità di energia elettrica consumata per il funzionamento del compressore viene chiamato **COP** (Coefficient of Performance) e dipende dalle temperature di evaporazione e di condensazione e dalla qualità intrinseca della macchina. Valori normali sono compresi fra 2,5 - 3,5.

Utilizzando una pompa di calore per il riscaldamento degli ambienti si può contestualmente avere il condizionamento e la deumidificazione sempre con la stessa macchina, come mostrato in fig. 2.2 e con un trascurabile aumento di prezzo dovendo equipaggiare la medesima solamente con una valvola di inversione del ciclo di Carnot.

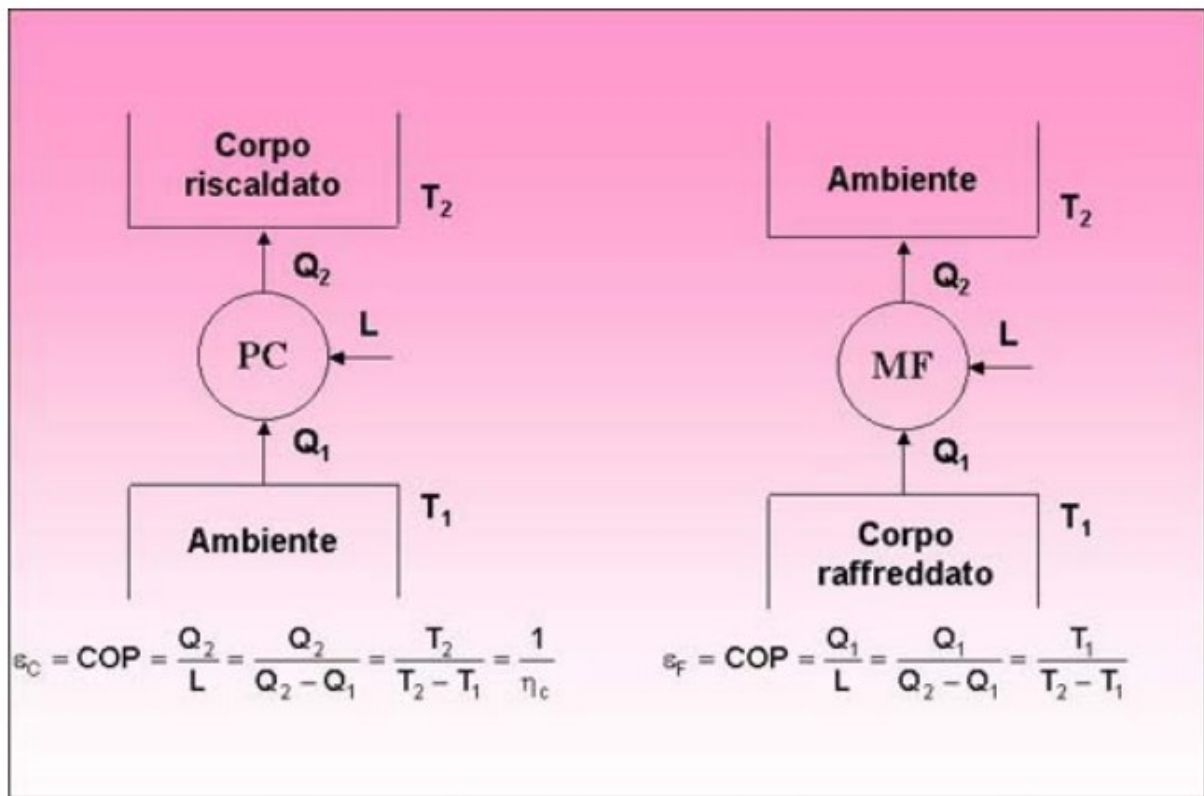


Fig 2.2: Confronto dei flussi energetici tra pompa di calore e macchina frigorifera

Altra applicazione della pompa di calore è il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria; si trovano in commercio pompe di calore con boiler incorporato nel quale è immerso il condensatore della macchina che si presenta come un normale serpentino di rame.

Di solito questo tipo di boiler a pompa di calore viene installato in un vano caldaia, in un box auto o in ambienti di servizio che si possono lievemente refrigerare utilizzando l'energia contenuta nell'aria per riscaldare l'acqua sanitaria contenuta nel boiler.

Ulteriore applicazione è il recupero di calore da processi produttivi industriali, calore che verrebbe comunque disperso e che si potrebbe utilizzare riducendo la potenza installata e i relativi costi di gestione; pertanto il maggior costo iniziale dell'impianto a pompa di calore potrebbe essere ammortizzato in un periodo di 4 - 5 anni nei casi meno

vantaggiosi (climatizzazioni degli ambienti) e di 2 anni nei casi migliori. Va tenuto presente inoltre che le prestazioni di una pompa di calore variano sensibilmente in funzione delle temperature di sorgente fredda e pozzo caldo. In particolare, più queste temperature sono vicine migliori sono le prestazioni, sia in termini di potenza fornita che in termini di COP, o rapporto tra energia termica fornita ed energia elettrica assorbita (fig. 2.2). Per questo motivo è consigliabile adottare sistemi di distribuzione del calore funzionanti a temperatura più bassa possibile.

2.1.1 Funzionamento ad aria

Per quanto riguarda le differenti sorgenti fredde l'aria ha il vantaggio di essere disponibile ovunque e di non necessitare di autorizzazioni per il prelievo, contrariamente all'esecuzione di uno scambiatore nel terreno, di un pozzo di presa d'acqua di falda o di una presa d'acqua di lago.

L'aria presenta variazioni di temperatura notevoli durante l'inverno, per cui è proprio quando la temperatura esterna è più rigida che la pompa di calore rende di meno. Sovente, dato il basso numero di giorni durante i quali si verificano temperature molto fredde, si preferisce aggiungere una sorgente d'appoggio, tipicamente una resistenza elettrica di bassa potenza, che aiuta la pompa di calore unicamente durante i giorni più freddi. La pompa di calore conseguentemente non è da dimensionare per la massima richiesta di potenza termica, ma per una potenza leggermente inferiore, ciò che rende l'installazione anche più interessante dal profilo economico.

Impianti interessanti sono pure ottenuti utilizzando l'aria esausta estratta dai locali, che può cedere importanti quantità di calore, permettendo alla pompa di calore di lavorare con ottime prestazioni durante tutto l'anno. In queste unità sono integrabili scambiatori di recupero diretto del calore, sistemi per la regolazione del ricambio automatico dell'aria in caso di afflusso di persone, dispositivi di trattamento dell'umidità, eccetera. Questi sistemi sono generalmente installati in ristoranti, sale conferenze, cinema, alberghi, palestre, eccetera.

2.1.2 Funzionamento ad acqua di falda

L'acqua di falda sotterranea o di lago costituisce pure un'interessante sorgente termica. Il suo uso, tuttavia è limitato alle zone in cui è possibile estrarre l'acqua ad un costo interessante (vicino alla riva o in presenza di falde a bassa profondità). Detti sistemi sono definiti a loop aperto. Le esperienze passate inoltre consigliano di essere molto attenti con l'uso dell'acqua in circuito aperto a causa dei rischi legati alla corrosione, allo sporramento e ai depositi calcarei, che possono danneggiare ed ostruire i sistemi. Anche in questo caso le temperature risultano relativamente costanti. L'uso dell'acqua di falda necessita di autorizzazione da parte dell'Autorità, che viene di norma concessa, a meno di conflitto con zone di protezione delle acque, di riserve o di captazioni idriche.

2.2 Il ciclo di Carnot

Carnot ha stabilito due punti molto importanti:

- la reale sorgente di potenza motrice di una macchina termica è la differenza delle temperature tra cui essa opera;
- il fluido impiegato nella macchina non ha alcuna rilevanza ai fini del rendimento.

In particolare un ciclo di Carnot, può essere effettuato da un fluido qualsiasi lungo quattro trasformazioni, come è mostrato sul piano cartesiano Pressione-Volume specifico in Figura 2.3

- Espansione isoterma AB a temperatura T_2 , calore scambiato Q_2 ;
- Espansione adiabatica BC, $Q=0$;
- Compressione isoterma CD a temperatura $T_1 < T_2$, calore scambiato Q_1 ;
- Compressione adiabatica DA, $Q=0$.

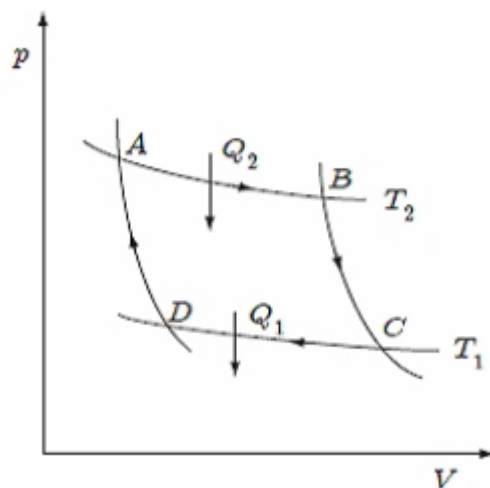


Fig 2.3: Ciclo di Carnot sul piano pressione p e volume V

Per definizione il ciclo di Carnot è reversibile, in quanto le trasformazioni BC e DA avvengono senza attriti e diabaticamente, poiché non si hanno scambi di calore con l'esterno. Inoltre il ciclo può essere eseguito da un qualunque sistema termodinamico che scambi calore esclusivamente con due sorgenti, quindi può essere chiuso esclusivamente con due trasformazioni adiabatiche.

In Figura 2.4-a sono mostrati tre diversi cicli di Carnot di una sostanza pura nella regione del liquido, nella regione di coesistenza liquido e vapore e nella regione di vapore, mentre in Figura 2.4-b è rappresentato un esempio di ciclo di Carnot nel caso di gas a comportamento ideale. Nonostante che il ciclo di Carnot sia un ciclo ideale, e quindi non riproducibile nella realtà, esso viene preso comunque in considerazione in quanto può essere pensato come ciclo standard di confronto relativo all'efficienza e alle quantità di calore trasferite in un sistema reale e, non ultimo, per capire l'interazione del sistema stesso con l'ambiente.

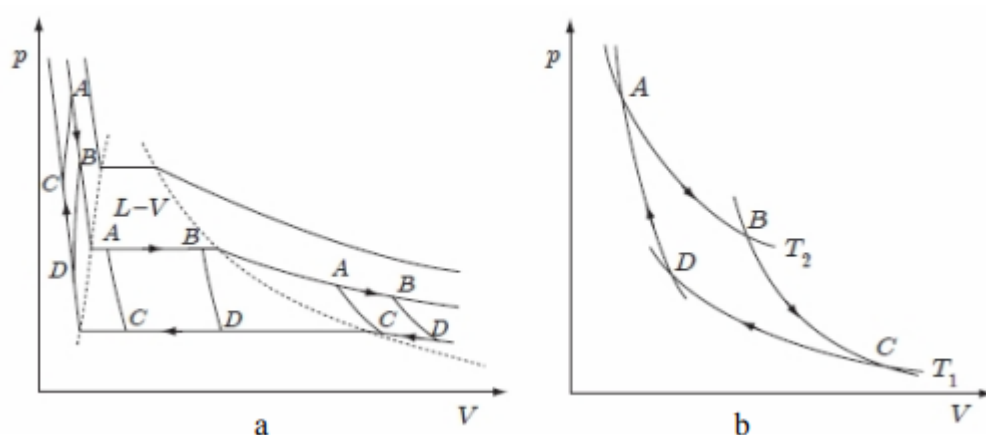


Fig 2.4: a) Ciclo di Carnot in una sostanza pura b) ciclo di Carnot del gas ideale

2.3 Il ciclo frigorifero

In un ciclo frigorifero un fluido allo stato di vapore viene compresso, condensato allo stato liquido e in seguito ad una caduta di pressione, viene fatto evaporare a bassa pressione (Figura 2.5). Il ciclo frigorifero è definito anche come ciclo inverso di Carnot, in quanto compie il processo opposto rispetto a quello della macchina a vapore; lo scopo del ciclo frigorifero infatti è quello di trasferire energia da un serbatoio a bassa temperatura ad uno a temperatura più elevata, richiedendo l'aggiunta di lavoro esterno.

Da notare infatti i sensi opposti del calore Q_1 e Q_2 della Figura 2.3 rispetto alla Figura 2.5. Il ciclo di Carnot inverso così descritto costituisce la base della refrigerazione. Il fluido frigorifero deve essere messo in comunicazione termica con i corpi da refrigerare quando, percorrendo il ciclo, si trova a temperatura sufficientemente bassa (più bassa di quella alla quale devono essere portati i corpi all'interno della cavità), in modo da ricevere il calore Q_1 , e deve essere messo in comunicazione con l'ambiente o con i comuni refrigeranti (aria, acqua) quando si trova a temperatura sufficientemente alta (più alta di quella dell'ambiente o dei refrigeranti esterni), in modo da cedere loro il calore Q_2 . Nelle macchine refrigeranti si ha quindi, mediante la spesa di un certo lavoro, come affermato dal II principio della Termodinamica, un vero e proprio trasporto di calore da bassa ad alta temperatura.

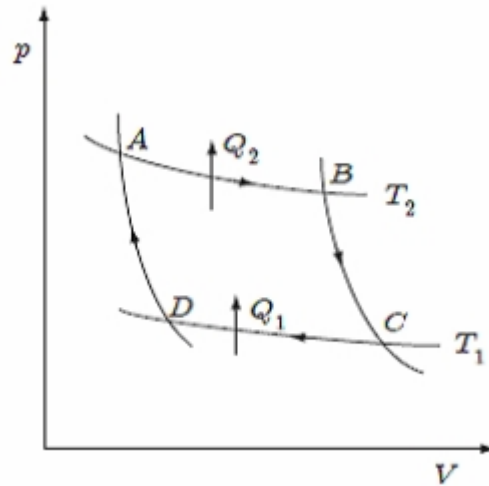


Fig 2.5: Ciclo di Carnot inverso sul piano pressione p e volume V

Per il ciclo frigorifero non si parla di efficienza, termine riferito al rapporto tra l'energia prodotta e quella assorbita, tipica dei cicli di potenza, ma di coefficiente di prestazione COP (Coefficient of Performance); esso è calcolato facendo il rapporto tra la quantità di calore sottratto a bassa temperatura Q_1 (ossia la quantità di freddo prodotta) e lavoro speso L per far funzionare il sistema (lavoro netto eseguito), secondo l'espressione (1.1):

$$\text{COP} = \frac{\text{potenza frigorifera}}{\text{lavoro}}; \quad (1.1)$$

Nel caso si percorra interamente un ciclo, il fluido ritorna nelle condizioni iniziali; di conseguenza la variazione di energia interna è nulla ed il lavoro risulta essere paria a (1.2):

$$L = Q_2 - Q_1; \quad (1.2)$$

Dove Q_1 e Q_2 sono rispettivamente la quantità di calore scambiate con la sorgente a temperatura T_1 e con la sorgente a temperatura T_2 . Il coefficiente di prestazione risulta essere (1.3):

$$\text{COP} = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}; \quad (1.3)$$

È facile dimostrare che il ciclo inverso di Carnot è, per le macchine refrigeranti, un ciclo di massimo effetto utile fra due temperature prefissate T_1 e T_2 . D'altra parte secondo la formula (1.4):

$$\text{COP} = \frac{Q_1}{L} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1}; \quad (1.4)$$

si evidenzia che il coefficiente di prestazione di un generico ciclo di Carnot è solo in funzione delle temperature delle sorgenti, che possono variare in linea teorica da zero ad infinito. Risulta che l'effetto utile è tanto più elevato quanto è più vicino all'unità il rapporto $\frac{T_1}{T_2}$, cioè quanto più vicine sono le temperature delle due isoterme. Questo risultato non deve portare a concludere che si possa far variare le temperature T_1 e T_2 a piacimento; queste due grandezze devono essere diverse tra di loro ed in particolare T_1 deve essere inferiore alla temperatura minima all'interno della cavità frigorifera, mentre T_2 è superiore alla temperatura ambiente. Negli impianti frigoriferi la grandezza $\Delta T = T_2 - T_1$ è inoltre in gran parte stabilita dalle superfici scambianti impiegate nella costruzione del condensatore e dell'evaporatore.

2.4 Ciclo frigorifero a compressione di vapore

La macchina frigorifera, in teoria, potrebbe essere realizzata mediante l'impiego di un unico cilindro nel quale scorre uno stantuffo a perfetta tenuta. Per essere fedeli al ciclo ideale di Carnot, questo cilindro dovrà avere pareti isolanti nelle fasi di espansioni adiabatiche, mentre permeabili nelle fasi di espansione e compressione isoterme. In realtà, per evidenti motivi di realizzazione, queste ultime due fasi conviene realizzarle non nel cilindro, ma in opportuni componenti differenti del circuito, in prima approssimazione costituiti da recipienti con grandi superfici in modo da permettere un adeguato scambio del calore (assorbito e trasmesso). Questo è rappresentato nello schema di Figura 2.6. Come prima approssimazione si può asserire che negli scambiatori di calore (nei quali avviene la trasmissione del calore) le trasformazioni avvengono a pressione costante; per non distaccarsi dal modello di massimo effetto utile conviene impiegare fluidi nello stato per il quale le trasformazioni isobare siano anche isoterme, cioè fluidi ideali nello stato di miscela.

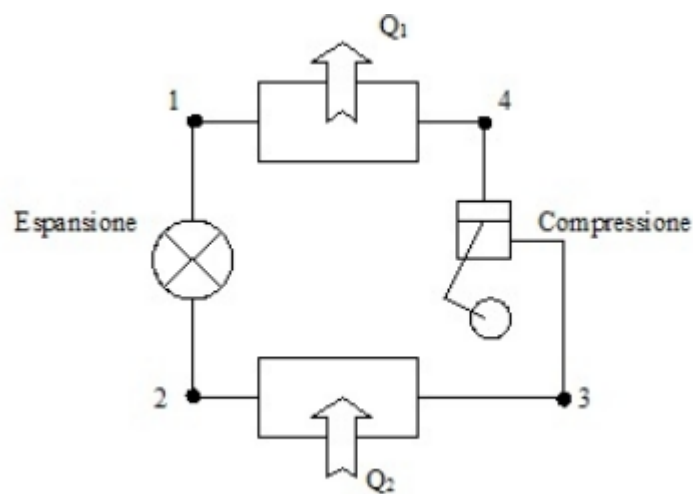


Fig 2.6: Macchina frigorifera – schema di funzionamento

In tal caso, per problemi meccanici dovuti all'espansione e alla compressione di fluidi bifasici, al precitato cilindro conviene sostituire in fase di espansione adiabatica una valvola. In questo modo la trasformazione da espansione isoentropica reversibile diviene una trasformazione isoentalpica reversibile. La conseguenza di questo cambio comporta un peggioramento dell'effetto utile rispetto al caso ideale. Analogamente, quanto detto, può essere esteso anche per la compressione, in quanto non è possibile effettuare una compressione "umida", ovvero una trasformazione all'interno della regione della miscela liquido-vapore. Le problematiche che porta con se una compressione umida sono essenzialmente:

- la presenza del liquido non permette una efficiente lubrificazione delle pareti del cilindro;
- se alla fine del processo di compressione rimanessero delle gocce di liquido, esse possono essere accumulate nel ristretto volume dello spazio morto del cilindro, provocando possibili danni alle valvole dello stesso.

Per questi motivi la trasformazione 2-3 di Figura 2.7 viene fatta proseguire sino ad incontrare la curva di vapore saturo (titolo $x=1$) in modo da far avvenire all'interno del compressore una compressione detta "secca". Ciò significa che all'ingresso del compressore entra vapore saturo e alla fine della compressione ci si trova nella regione di vapore surriscaldato. L'effetto del passaggio da una compressione umida a una compressione secca comporta un aumento dell'effetto frigorifero, ma anche un

conseguente aumento, in percentuale superiore, del lavoro di compressione. Questo giustifica il peggioramento del coefficiente di prestazione.

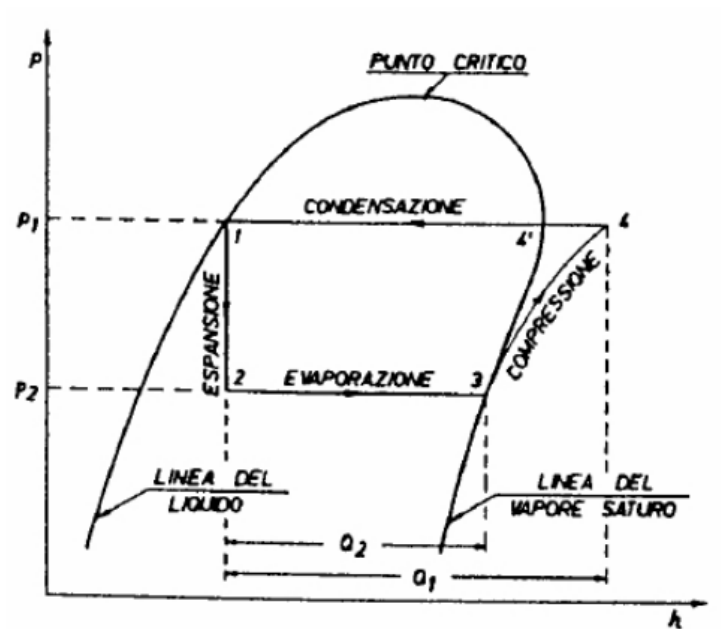


Fig 2.7: Ciclo frigorifero ideale sul piano pressione p entalpia h

Una rappresentazione del ciclo frigorifero più efficace e di gran lunga più diffusa è quella di utilizzare il diagramma pressione entalpia ($p - h$), come quello rappresentato in Figura 2.7. Questo tipo di rappresentazione è entrata nell'uso della tecnica del freddo in quanto le isoterme nella zona di miscela liquido - vapore seguono l'andamento delle isobare, rendendo più leggibile i cicli pratici.

2.4.1 Descrizione del ciclo frigorifero a compressione di vapore ideale

In seguito verrà descritto il funzionamento di un ciclo a compressione ideale, prendendo come riferimento lo schema di Figura 2.6 e il diagramma di Figura 2.7. La trasformazione 1-2 rappresenta l'espansione isoentalpica alla pressione di condensazione p_1 e quella di evaporazione p_2 . Durante l'espansione, che avviene nella

valvola di espansione, parte del refrigerante evapora e la temperatura passa dalla temperatura di condensazione a quella di evaporazione. Nella trasformazione 2-3 avviene l'evaporazione del fluido all'interno dell'evaporatore. Il fluido evaporando sottrae calore dall'ambiente che si desidera raffreddare. Nella fase 3-4 rappresenta il processo di compressione isoentropica che avviene nel compressore dalla pressione di evaporazione alla pressione di condensazione. Nella sezione 4-4' viene rappresentato il desurriscaldamento e, successivamente nella fase 4'-1, la vera e propria condensazione del fluido. Entrambe le trasformazioni avvengono nel condensatore.

Sempre con riferimento alla Figura 2.7 si possono scrivere le equazioni dell'energia nei singoli componenti, con ipotesi che la macchina sia attraversata da un fluido a moto permanente e che si trascuri la variazione di energia potenziale. Per il compressore si può scrivere (1.5):

$$Q=0, L = h_3 - h_4 \quad (1.5)$$

Per la valvola di espansione si può supporre (1.6):

$$L=Q=0, h_1 = h_2 \quad (1.6)$$

Per l'evaporatore si può affermare che (1.7):

$$L=0, Q=h_3 - h_2 \quad (1.7)$$

Ed infine per il condensatore vale la (1.8):

$$L=0, Q=h_1 - h_4 \quad (1.8)$$

2.4.2 Descrizione del ciclo frigorifero a compressione di vapore delle macchine reali

In questo sotto paragrafo verranno considerati alcuni aspetti che vanno ad influire sul ciclo frigorifero; il ciclo effettuato da macchine reali non coincide esattamente con il ciclo teorico precedentemente descritto. Di seguito verranno analizzate tali discrepanze. All'ingresso del compressore, il vapore aspirato è leggermente surriscaldato. Questo surriscaldamento può avvenire all'interno dell'evaporatore, mediante un'opportuna taratura del sistema di regolazione usato, oppure all'esterno, mediante un apporto di calore tra l'evaporatore e il compressore. Se il surriscaldamento avviene all'interno dell'evaporatore, questo porta un aumento dell'effetto utile, ma di conseguenza un aumento del volume specifico del vapore aspirato. La conseguenza di ciò è una riduzione della portata ponderale del refrigerante. Si ricorda che il surriscaldamento del fluido frigorifero all'ingresso del compressore sostanzialmente è un modo per assicurarsi che il fluido sia totalmente allo stato di vapore e che la temperatura del refrigerante all'ingresso sia leggermente più alta rispetto alla temperatura di evaporazione, per preservare il corretto funzionamento del compressore stesso. Un'altra accortezza è quella di sottoraffreddare il fluido in ingresso della valvola di espansione. Se il processo di sotto raffreddamento è dovuto ad un fluido esterno al ciclo frigorifero (aria, acqua), si ha una diminuzione dell'entalpia in ingresso dell'evaporatore che comporta un aumento dell'effetto utile, a parità di lavoro speso per la compressione. Alcuni impianti frigoriferi sono dotati di scambiatori liquido – gas, in modo che il fluido allo stato liquido proveniente dal condensatore, mediante scambio in controcorrente, viene sotto raffreddato attraverso i vapori provenienti

dall'evaporatore. Anche questa soluzione assicura la completa evaporazione di eventuali goccioline presenti nel fluido frigorifero aspirati dal compressore, ovvero quello di sottoraffreddare il refrigerante liquido in quei casi nei quali esiste la possibilità di avere una parziale evaporazione a monte della valvola di espansione, determinata o da un'importante distanza tra evaporatore e condensatore o un notevole dislivello tra il condensatore (ubicato nella parte inferiore) e l'evaporatore (generalmente posto in alto). La Figura 2.8 raffigura quanto detto finora; nello specifico il tratto 3 – 4 rappresenta il surriscaldamento del fluido, mentre il tratto 1-6 mostra il sottoraffreddamento.

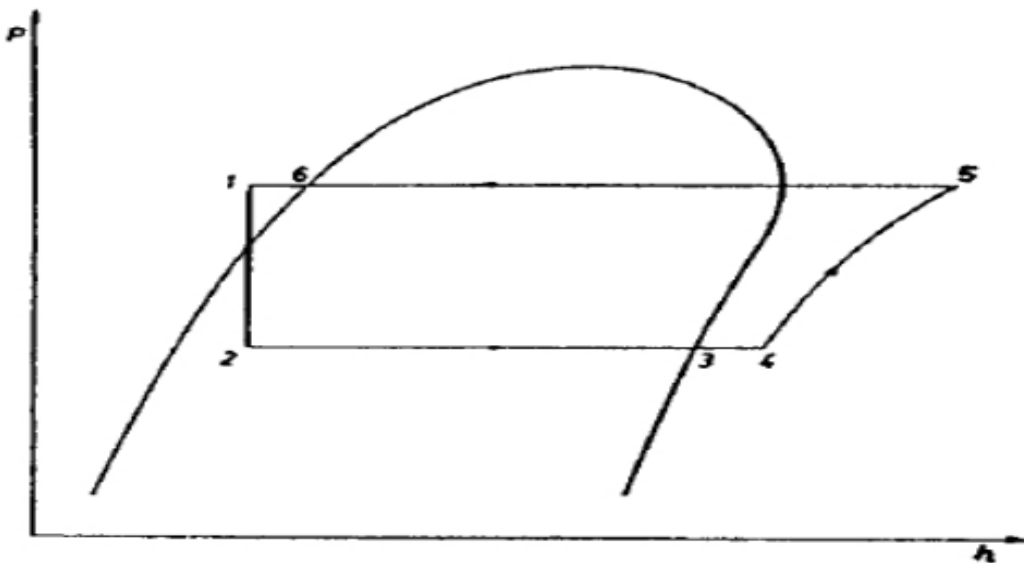


Fig 2.8: Ciclo frigorifero con la presenza di surriscaldamento e sottoraffreddamento

Capitolo 3: Apparecchiature utilizzate nelle prove sperimentali

3.1 Generatore fotovoltaico: I-Kube

Il sistema di produzione di energia elettrica da energia solare le cui caratteristiche di prestazione sono state utilizzate per i calcoli e la sperimentazione è un Generatore fotovoltaico mobile, con sistema di accumulo denominato “I-Kube F150”.

Ideato allo scopo di fornire energia elettrica in tutte le zone del globo non coperte da una rete elettrica e per tutti gli utilizzi che richiedono di poter spostare la propria fonte di energia.

Il generatore è trasportabile, compatto durante il trasporto e apribile a vela con lo spiegamento di nove moduli fotovoltaici.

Il generatore fotovoltaico trasportabile I-Kube permette di generare energia elettrica in presenza di radiazione solare con un determinato livello di flusso. L’energia elettrica prodotta può essere utilizzata direttamente o accumulata in una serie di batterie in modo da poterla utilizzare nei periodi di assenza di radiazione, come durante le ore notturne oppure nei periodi nei quali la radiazione ha un livello inferiore al gap di energia all’interno del quale non si innesca il processo fotovoltaico.

Come è possibile rilevare dalla Fig.3, di seguito riportata, il generatore è costituito da un telaio di profilati metallici assemblati a formare un cubo le cui pareti sono tamponate con pannelli di lamiera. All’interno del cubo sono alloggiare le batterie di accumulo e

l'inverter per la trasformazione della corrente elettrica da continua ad alternata, alla corretta frequenza per essere utilizzata dai sistemi di climatizzazione.



Fig.3.1 Le modalità di uso del generatore I-Kube

Inoltre all'interno dell'inverter vi è il regolatore di carica che controlla il flusso di energia da e verso il sistema di accumulo. Tutta la logica di funzionamento del sistema dipende dall'inverter.

I quadri elettrici di protezione e distribuzione contengono gli interruttori magnetotermici differenziali di protezione e gli elementi di distribuzione alle utenze dell'energia elettrica.

Al cubo descritto sono collegati attraverso un sistema di apertura ad attuatori in pressione nove moduli fotovoltaici connessi in stringhe che forniscono energia elettrica all'inverter.

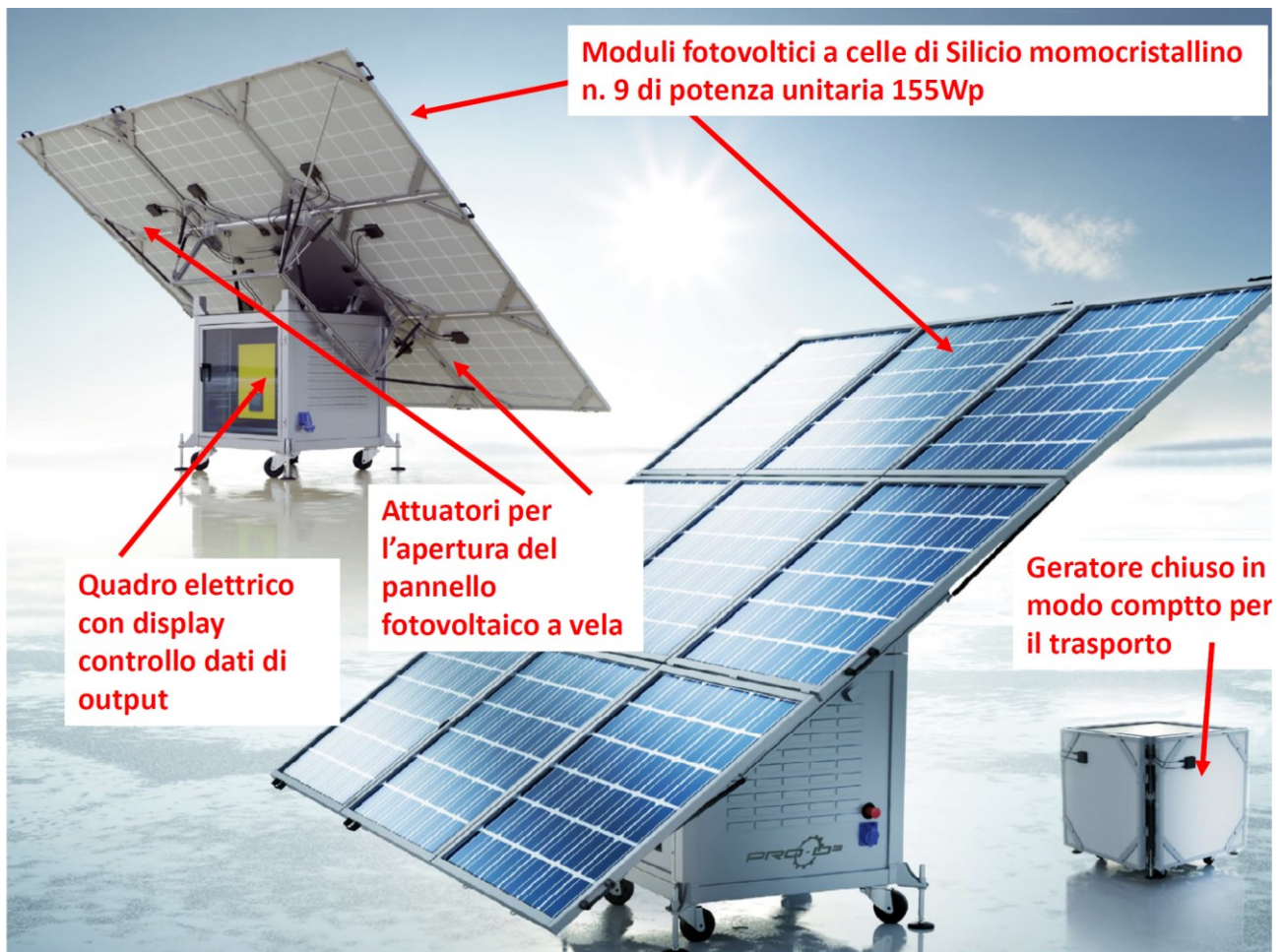


Fig 3.2 I componenti principali del generatore I-Kube

Il generatore fotovoltaico, in uscita dall'inverter è in grado di garantire fino a più di 3 kW di potenza se la radiazione solare raggiunge il valore massimo.

Le batterie contenute all'interno della cassa vengono ricaricate dal generatore fotovoltaico che, con la sua superficie di 9 m^2 , sviluppa una potenza di 1.5 kW.

È dotato di una presa ausiliaria di emergenza per ricaricare le batterie anche dalla rete elettrica o da gruppo elettrogeno.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali del generatore:

Numero moduli FV generatore	9x155 W
Tipo moduli FV generatore	Monocristallini
Potenza generatore fotovoltaico	1.395 W
Potenza inverter	4000 W
Sistema di accumulo	Batteria AGM
Tipo sistema di accumulo	8 batterie da 6 V 225 Ah
Capacità sistema di accumulo	10800 Wh
Uscita	230 V 32 A 50Hz
Temperatura di esercizio	-10°+50°
Dimensioni da chiuso (cm)	127x127x120(h)
Dimensioni da aperto (cm)	256x313x227(h)
Peso complessivo	550 kg

Caratteristiche dei moduli fotovoltaici:

tipo di modulo	Monocristallino
Potenza	155 W
Dimensioni	986mmx986mm
Peso	12 Kg
Tensione alla massima potenza (Vmp)	16.54 V
Tensione a circuito aperto (Voc)	21.6 V
Corrente alla massima potenza (Imp)	9.37 A
Corrente di corto circuito (Isc)	9.98 A
Potenza minima garantita	150 W
Tolleranza	+/-3%
Tensione massima del sistema	1000 V
Efficienza cella	16.60%
NOCT	41.32°C
Coefficiente di temperatura (Pmax)	-0.43%
Coefficiente di temperatura (Voc)	-0.34%
Coefficiente di temperatura (Isc)	0.03%

Caratteristiche delle batterie:

Tecnologia	AGM
Numero celle	3
Voltaggio	6 V
Capacità	225 Ah
Dimensioni	243 mm x 187 mm x 275 mm
Peso	32 Kg
Corrente massima di scarica	2250 A (6 sec)
Temperatura di esercizio (scarica)	-20°C +60°C
Temperatura di esercizio (carica)	0°C 50°C
Temperatura di esercizio (stoccaggio)	-20°C +60°C
Tensione nominale di carica	6.8 VDC a 25°C
Corrente massima di carica	67.5 A

Dalla pubblicazione tecnica del produttore del Generatore sopra presentato, si riporta una tabella di previsione di energia elettrica producibile in un giorno tipo dei vari mesi dell'anno, espressa in kWh e riportata nella tabella seguente.

F150	GENNAIO	2,65	7,44	6,98	6,72
	APRILE	5,96	5,64	7,94	5,37
	LUGLIO	7,53	4,83	7,02	4,70
	OTTOBRE	4,31	7,14	6,72	6,58
	Media (anno)	5,11	6,33	7,24	5,89

3.2 Tenda P.I. 88 di protezione civile:

3.2.1 Generalità

Questo tipo di tenda è caratterizzato dalla seguente struttura: una armatura rigida realizzata con pali metallici di piccolo diametro sorregge l'involucro costituito da due teli di tessuto distanziati da una intercapedine d'aria. La forma della tenda prevede un tetto a due falde e pareti inclinate, sorrette da pali metallici che si appoggiano su traverse che costituiscono il perimetro di base che consente di fissare la tenda senza picchetti al suolo, permettendo di montarla anche su un basamento di cemento. L'involucro è dotato di un telo esterno di tessuto di cotone pesante, impermeabile e di un telo interno pure di cotone, ma più leggero, che forma col primo una intercapedine di circa 30 cm nel quale l'aria può costituire una resistenza termica che si oppone alle condizioni climatiche esterne. Questo telo interno si richiude, senza soluzione di continuità, sul telo di pavimentazione che preserva le persone dal contatto diretto con il terreno.

La tenda è progettata e costruita per garantire un ambiente interno confortevole, nelle condizioni di sicurezza previste dalle normative vigenti, in occasione degli eventi calamitosi quale alloggio temporaneo per la popolazione, secondo le attività di protezione civile.

3.2.2 Descrizione della tenda oggetto di analisi

Nelle situazioni di emergenza o nelle attività di pronto intervento è fondamentale dotarsi di mezzi ed attrezzature che permettano di fronteggiare rapidamente ed in modo efficace le necessità di alloggio degli individui che si presentano a seguito di disastri derivanti da eventi calamitosi naturali od antropici.

Uno dei mezzi utilizzati è la tenda di cui, nel proseguo del lavoro, si utilizza il modello P.I.88 in dotazione alla Protezione Civile Marche della quale, in Figura 3.2 si riporta lo schema generale.

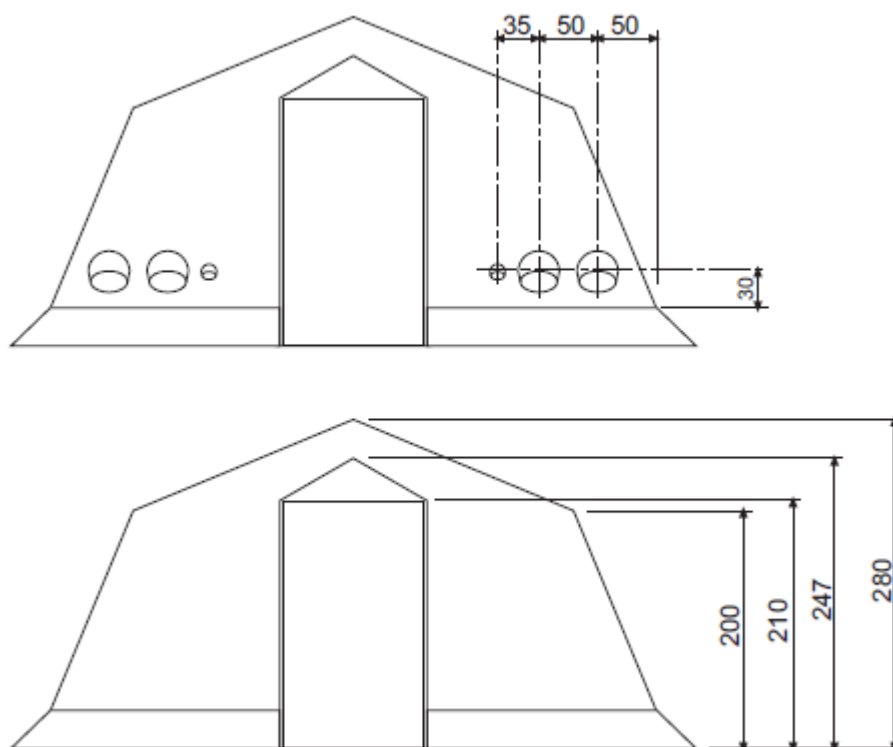


Fig. 3.2 Disegno delle facciate anteriore di ingresso e posteriore della tenda

La forma dell'involucro e i materiali che costituiscono la tenda determinano le condizioni climatiche ambientali interne, influenzate dalle condizioni climatiche esterne. Spesso si determinano all'interno dell'involucro meccanismi di surriscaldamento dell'aria estivo e di raffreddamento invernale che producono negli individui sensazioni di discomfort termico. Allo stesso tempo i sistemi attualmente impiegati per il riscaldamento invernale, come ad esempio i radiatori elettrici, non garantiscono condizioni di benessere a causa della sua stratificazione termica che determina maggiori dispersioni di calore e sensazioni di difficile respirazione.

Come anticipato in precedenza l'involucro costituito dalle pareti, la copertura e la pavimentazione della tenda è realizzato secondo la seguente composizione:

Il telo di copertura in tessuto di cotone/modacrilico, reso impermeabile per applicazione sulla superficie di P.V.C., ignifugo in colore blu, esso ha ovviamente lo scopo di impermeabilizzazione e di barriera alle condizioni termo-igrometriche determinate dal clima esterno.

Il telo interno in tessuto di cotone/modacrilico ha lo scopo di realizzare un involucro continuo con copertura, pareti e pavimento.

Tra i due teli, escluso quello di pavimentazione che appoggia sul basamento, si realizza una intercapedine nella quale l'aria in essa compresa, pur muovendosi per convezione termica, determina una resistenza termica che limita le dispersioni termiche dall'ambiente interno verso quello esterno nel periodo invernale e previene, nel periodo estivo, il surriscaldamento dell'ambiente interno per che si determinerebbe per effetto dell'assorbimento della radiazione solare sulla superficie esterna del telo esterno e per la differenza di temperatura, sempre tra ambiente esterno e quello interno.

Delle due testate verticali della tenda quella anteriore è dotata di una porta, protetta da verandino, che consente anche la eventuale congiunzione in serie di due tende, nonché l'unione ad altre per mezzo di moduli di collegamento, come nel sistema di tende costituente il Posto Medico Avanzato per il primo intervento sanitario nelle aree di ricovero.

Come si può evincere dalla figura le fiancate del manufatto sono inclinate dotate di ampie finestre in PVC trasparente, fornite di zanzariera.

Le falde di copertura, in tessuto poliestere ignifugo spalmato in PVC, hanno anch'esse andamento leggermente inclinato per lo scorrimento delle acque meteoriche.

I tiranti in corda consentono la controventatura con i picchetti in dotazione.

Due manichette passanti applicate alla parete di ingresso, consentono il passaggio di cavi elettrici ed eventuali tubi di collegamento tra l'unità motocondensante esterna e l'unità interna di una pompa di calore utilizzata per la climatizzazione dell'ambiente interno.

La ventilazione per il ricambio dell'aria interna, con lo scopo di rendere salubre l'ambiente interno, è del tipo naturale ed avviene per l'introduzione dell'aria esterna attraverso la porta di ingresso.

Quindi riassumendo la tenda presenta:

- la camera interna completa di pavimento,
- telo ombreggiante
- modulo di collegamento
- sistemi di riscaldamento e condizionamento
- impianto di illuminazione

Montaggio Tenda

Area

Il terreno deve essere liberato dalla presenza di arbusti, pietre e altri oggetti che possano danneggiare la tenda. Devono essere inoltre evitate zone sottostanti alberi.

La tenda ha un lato anteriore e un lato posteriore, asservito da eventuali dispositivi di illuminazione e riscaldamento/condizionamento. Il lato posteriore si caratterizza dalla presenza sul telo di bocchettoni circolari per il passaggio dei cavi o dei tubi di mandata dell'aria. Individuare l'orientamento della tenda in funzione di tali dispositivi.

- Per il montaggio della tenda occorrono un minimo di 4 persone
- Si inizia predisponendo al suolo in vari pezzi componenti il tetto
- Comporre tutta l'armatura del tetto e le gambe di un lato, complete dei piedi di appoggio.
- Disporre la camera a terra sotto la paleria.
- Agganciare tutta la camera alla paleria partendo dal laterale completo di piedi.
- Prima di completare il montaggio della camera, in questa fase è necessario procedere con il telo esterno.
- Srotolare il telo a terra lungo il lato con gambe montate e quindi si colloca sull'armatura.
- Sollevare il lato della paleria, inserendo le gambe nei loro alloggiamenti.
Collegare le traverse perimetrali parallele al terreno.

Come detto in precedenza la sperimentazione prevedeva la realizzazione del sistema generatore fotovoltaico-tenda per misurare la quantità di energia elettrica da fornire al climatizzatore per mantenere costante la temperatura all'interno della tenda stessa. Per questo all'inizio del mese di Gennaio 2020 con l'ausilio dei volontari della protezione civile di Ancona si è montata, sul terrazzo del laboratorio della Energetica ambientale una tenda del tipo sopra descritto.

Purtroppo a seguito di un evento atmosferico molto violento con velocità del vento elevatissimo e a raffiche la tenda ha avuto gravi danni alla struttura metallica e ai teli di copertura per cui è stato necessario smontarla, senza poterla utilizzare per le misure.

Nelle figure seguenti si riportano le immagini relative al montaggio della tenda sul terrazzo del laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento Industriale e Scienze Matematiche.



Fig.3.4 Volontari della Protezione Civile iniziano il montaggio della tenda



Fig.3.5 Montaggio tenda terminato



Fig.3.6 Il gruppo che ha installato la tenda



Fig.3.7 Condizioni della tenda dopo l'evento atmosferico

3.3 Modulo abitativo trasportabile

Il container, inteso come modulo standardizzato, adibito a necessità alloggiative o sociali, ha rappresentato il più diffuso apparato utilizzato per fronteggiare condizioni emergenziali, grazie ai vantaggi offerti in termini di autonomia funzionale, rapidità di fornitura, trasporto e posizionamento, possibilità di recupero e successivo stoccaggio, facilità di manutenzione.

Il modulo abitativo che è stato utilizzato per i calcoli è uno di quelli standardizzati, utilizzati dalla Protezione Civile. Le sue caratteristiche tecniche possono essere rilevate dalle schede tecniche emesse dalla Protezione Civile stessa di cui di seguito vengono riportati i passi principali e nella tabella seguente le dimensioni di ingombro.

ISO 20	USO ABITATIVO PER NUCLEO DA 1/2 PERSONE			
La superficie complessiva è di circa 18mq. La superficie d'uso unitaria è pari a 9-18mq/abitante. Sup. camere = circa 38% Sup. comune = circa 31% Disimpegno = circa 0% Servizi = circa 31%	Dimensioni esterne		Dimensioni interne	
	Lunghezza	6,05m	Lunghezza	5,80m
	Larghezza	2,99m	Larghezza	2,75m
	Altezza	2,74m	Altezza	2,20m
	Composto da: 1 camera da letto; soggiorno con angolo cottura; servizio igienico.			

Una delle caratteristiche più importanti è la mobilità attraverso i vari mezzi di trasporto quali aereo, nave, camion. Per questo le dimensioni devono riguardare le stesse utilizzate per i container di trasporto materiale. Un altro punto cruciale è il comfort nella abitabilità e per questo le pareti devono rispondere a requisiti di comportamento termico dei materiali piuttosto stringenti. Di seguito si riportano brani estratti dalle schede tecniche che descrivono le caratteristiche menzionate in precedenza.

Tipologia

Devono avere le dimensioni di un container ISO standard da 40 piedi, o da 20 piedi a seconda della richiesta, allargati a metri 2,99 esterno, per un'altezza max. di mt. 2,74 (container ISO super alto), una struttura idonea alla sovrapposizione di un altro modulo di pari dimensione durante l'immagazzinamento. Il sistema di sollevamento deve prevedere l'uso di agganci posti esclusivamente sulla struttura di copertura per mezzo di fori, golfari o altro, con diametro utile non inferiore a 45 mm. La struttura di base deve essere predisposta per l'ancoraggio a semi rimorchio, dotato di twist lock per container da 40 o da 20 piedi, con due longheroni di rinforzo distanziati e collegati tra loro, in larghezza tale da permettere l'appoggio su tutta la lunghezza del cassone dell'automezzo di trasporto.

Basamento modulo

Il basamento portante deve essere realizzato con profili longitudinali (due longheroni) e rompi-tratta, tipo trave quali NP-IPE e/o profili zincati, di adeguato spessore ed altezza minima 150 mm. La struttura portante, nel suo complesso (struttura pavimento più longheroni) deve avere altezza non inferiore a 260 mm dal piano di appoggio, in modo da minimizzare l'effetto di flessione e torsione sotto carico laddove il modulo fosse posizionato in modo non perfetto sulle traversine di appoggio. Dovranno essere previsti altresì elementi strutturali verticali irrigidenti tra basamento/copertura, in posizione intermedia rispetto allo sviluppo longitudinale, che non siano i pannelli

parete oltre descritti e che permettano il sostentamento di un altro modulo in sovrapposizione.

Telaio tetto / copertura

Il telaio di copertura deve prevedere strutture tali da garantire l'appoggio per altro modulo in sovrapposizione, con elementi trasversali di supporto in profili pesanti e piastre d'angolo con bordo sagomato, in modo da assicurare il ritegno per il basamento del secondo modulo posto in sovrapposizione. Inoltre la copertura dovrà disporre di almeno quattro sistemi di convogliamento delle acque meteoriche sino al livello del basamento per permettere il sicuro deflusso delle acque piovane. Tetto a doppia copertura quando prevista questa tipologia, la copertura del tetto (già in pannelli grecati posti trasversalmente sulla lunghezza), dovrà essere ulteriormente protetta con una lamiera grecata, posta longitudinalmente, con pendenza e scarichi alle due estremità. Lo scarico delle acque dovrà essere, in ogni caso, esterno alle strutture del tetto, fermo restando la totale impermeabilità della copertura principale la quale, in ogni caso, non dovrà essere assolutamente forata o interessata dal riporto della doppia copertura. Tale soluzione dovrà permettere la creazione di una camera d'aria tra pannelli e grecata esterna, impedendo alla pioggia di raggiungere i pannelli sottostanti. La doppia copertura prevederà la disposizione di un lamierato grecato preverniciato di spessore non inferiore a 6/10 di mm. Il grecato non dovrà in alcun modo sporgere dal limite massimo superiore delle strutture del tetto e permettere in ogni caso la sovrapposizione del 2° modulo, come già descritto, permettere sempre il sollevamento dal tetto, senza inibire altre funzioni e/o prerogative del modulo.

Il collegamento tra i sistemi telaio basamento - telaio copertura - elementi verticali di sostentamento dovrà essere esclusivamente di tipo imbullonato, non saldato, per facilitare le manutenzioni e l'intercambiabilità totale dei vari componenti.

Coibentazioni

Per la coibentazione di pareti e copertura è richiesto un coefficiente globale di trasmissione termico U uguale o inferiore a $0,38 [W / m^2K]$ con un pannello di spessore uguale o superiore a 60 mm. Per il pavimento, il K non potrà essere superiore a $0,52 [W / m^2K]$.

Pannelli

Le pareti esterne, i divisori interni, il soffitto/copertura e la pavimentazione devono essere realizzati con pannelli metallici isolanti, dotati di supporti esterni in acciaio zincato con interposta schiuma poliuretana o lana minerale, classe di reazione al fuoco 0-2 del D.M. 26/06/84 (densità minima del poliuretano pari a 38 kg/m^3 ; della lana minerale pari 90 kg/m^3). Allo scopo della tenuta strutturale dell'insieme, i pannelli parete perimetrali dovranno disporre di lamierati esterni con spessore non inferiore a 6/10 di mm. Tutte le parti a vista dei pannelli devono essere verniciate o preverniciate così come le relative strutture di contenimento (in acciaio zincato di sezione non inferiore a 2 mm.). I pannelli parete perimetrale dovranno avere in ogni caso ancoraggio inferiore sotto il livello di isolamento del pavimento, con possibilità di scarico delle acque alla base, per evitare ristagni, entro profili di contenimento e in modo che il deflusso acque non possa interessare, in nessun caso per tracimazione, la

pavimentazione del modulo, anche in mancanza o deterioramento degli eventuali sigillanti. Il fissaggio dei pannelli copertura sul relativo telaio deve prevedere viterie, mastici, guarnizioni e comunque metodi applicativi che garantiscano assolutamente la tenuta all'acqua, in qualsiasi condizione atmosferica e indipendentemente dai sistemi di posa del modulo. Il sistema di ancoraggio pareti perimetrali - telaio basamento - telaio copertura - elementi verticali, dovrà permettere l'inserimento, a posteriori, di pannelli grecati di riporto per interventi di ripristino o sistemazione della parete stessa senza asportare il pannello isolante esistente e senza che questi sporgano dagli ingombri massimi originari di progetto o che necessiti applicazione di ulteriore profiliera diversa da quella esistente.

Serramenti interni /esterni

I serramenti devono essere in alluminio di robusta fattezze, i vetri devono essere del tipo temperato; le finestre devono essere dotate di tende interne tipo veneziana guidate sui lati, il funzionamento delle finestre dovrà essere di tipo scorrevole. Ogni serramento esterno deve essere dotato di proprio gocciolatoio superiore.

Trattamenti protettivi dei materiali

I materiali esterni a vista, interni al modulo e le strutture devono essere trattati per ottenere protezione dalla corrosione per ossidazione e devono inoltre essere ignifughi o autoestinguenti, con particolare cura per la protezione delle saldature. I materiali, inoltre, sotto l'azione del calore, non devono rilasciare sostanze tossiche o nocive e

devono garantire la stabilità nel tempo delle caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche.

Pavimento

Il piano di calpestio dovrà essere in PVC a tutto consumo, totalmente incollato su adeguato supporto e saldato nelle giunte in modo che sia stagno, bloccato alle estremità contro le pareti esterne da adeguato profilo o battiscopa. Classe di reazione al fuoco 1 (uno) in base alle vigenti normative in materia. Non rientra nella fattispecie il linoleum di uso comune in box cantieristici. Il supporto del piano di calpestio (assali di pavimento) dovranno essere in legno multistrato, insensibile all'umidità, fissato direttamente su strutture portanti poste sotto la coibentazione e garantire la planarità del pavimento in ogni condizione. Le giunzioni assali, oltre ad essere fissate anch'esse direttamente su strutture sottostanti la coibentazione, dovranno essere supportate da elementi rigidi di riscontro, ad evitare scalini, senza intaccare o interrompere l'isolamento del pavimento.



Fig.3.8 Container abitativo

3.4 Climatizzatore portatile a pompa di calore

La pompa di calore utilizzata nei calcoli è del tipo Split System, una modalità che prevede la separazione della unità moto-condensante, da installare all'esterno dalla unità evaporante interna. Per questo si possono elencare i materiali che la costituiscono come di seguito:

1 - Unità interna. 2 - Unità esterna. 3 - Linea flessibile di collegamento. 4 - Pannello comandi. 5 - Griglia uscita aria. 6 - Sistema di regolazione flusso aria. 7 - Filtro aria. 8 - Sportello di copertura attacchi rapidi. 9 - Tasto di accensione generale. 10 - Tappo e raccordo per svuotamento completo dell'acqua di condensa. 11 - Maniglia di trasporto



Fig.3.9 Climatizzatore portatile a pompa di calore

Considerando le note teoriche riportate nei precedenti capitoli riguardanti la termodinamica dei cicli frigoriferi, la pompa di calore utilizzata nelle valutazioni teorica e sperimentale è quella riportata in Fig.3.9.

Come già accennato, la pompa di calore è del tipo split – system ed in figura il componente in primo piano è la cosiddetta unità interna che va posizionata all'interno della tenda o del modulo abitativo per climatizzarlo. In secondo piano si può vedere la moto-condensante, collegata alla unità interna attraverso tubazioni che contengono il fluido frigorifero che determina le quattro trasformazioni termodinamiche caratteristiche del ciclo di Carnot inverso. La potenza frigorifera è di 4,26 KW.

3.5 Radiatore elettrico ad olio:

I radiatori ad olio sono comuni radiatori elettrici in cui l'olio riscaldato da una resistenza elettrica, cede calore alla superficie radiante per lo scambio termico con l'ambiente.

I radiatori ad olio sono apparati alimentati elettricamente che vengono utilizzati per il riscaldamento delle abitazioni e che, per effetto Joule trasformano in calore l'energia elettrica. Nel radiatore ad olio, il calore è prodotto da una resistenza elettrica che è allocata all'interno del radiatore stesso ed immersa in un bagno d'olio. Questo poiché dotato di elevata capacità termica, accumula il calore ceduto dalla resistenza. Calore che poi lentamente cede all'ambiente da riscaldare. L'olio pertanto non ha una funzione di combustibile ma semplice serbatoio termico.

Quello utilizzato nei calcoli ha una potenza termica di 1,5 KW.



Fig.3.10 Radiatore elettrico

3.6 Attività svolte

3.6.1 Obiettivo tesi

Valutare il funzionamento del sistema i-kube per la produzione di energia elettrica per la climatizzazione di una tenda, attraverso un radiatore elettrico e/o pompa di calore dimostrando quanto questo strumento funzionante ad energia rinnovabile di cui la protezione civile si è dotata, quanto può essere usato e quanto può essere efficace.

Analizzare le prestazioni che I-Kube fornisce in termini ambientali (CO₂ risparmiata e risparmio di consumi elettrici e soprattutto l'autonomia del sistema).

3.6.2 Apparato sperimentale

Gli studi per l'analisi energetico ambientale di un sistema di alimentazione elettrica da fotovoltaico di tende o moduli abitativi temporanei si sono svolti presso il Laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Più in particolare le fasi sperimentali hanno previsto l'installazione del Modulo I-Kube e di una tenda del tipo PI 88 sul terrazzo del DIISM destinato alle sperimentazioni di elementi funzionanti con le energie rinnovabili.

Il sistema installato è costituito dal Modulo I-Kube che alimenta attraverso cavo elettrico il climatizzatore all'interno della tenda. Il modulo I-Kube, a sua volta, è collegato alla rete elettrica in modo che le apparecchiature alla tenda possano essere alimentate con precedenza dalla energia elettrica prodotta da fotovoltaico e solo in assenza della stessa o in quantità non sufficienti da soddisfare le condizioni climatiche

interne da batteria di accumulo di cui è dotato il modulo o da rete elettrica secondo lo schema seguente di Fig.3.11

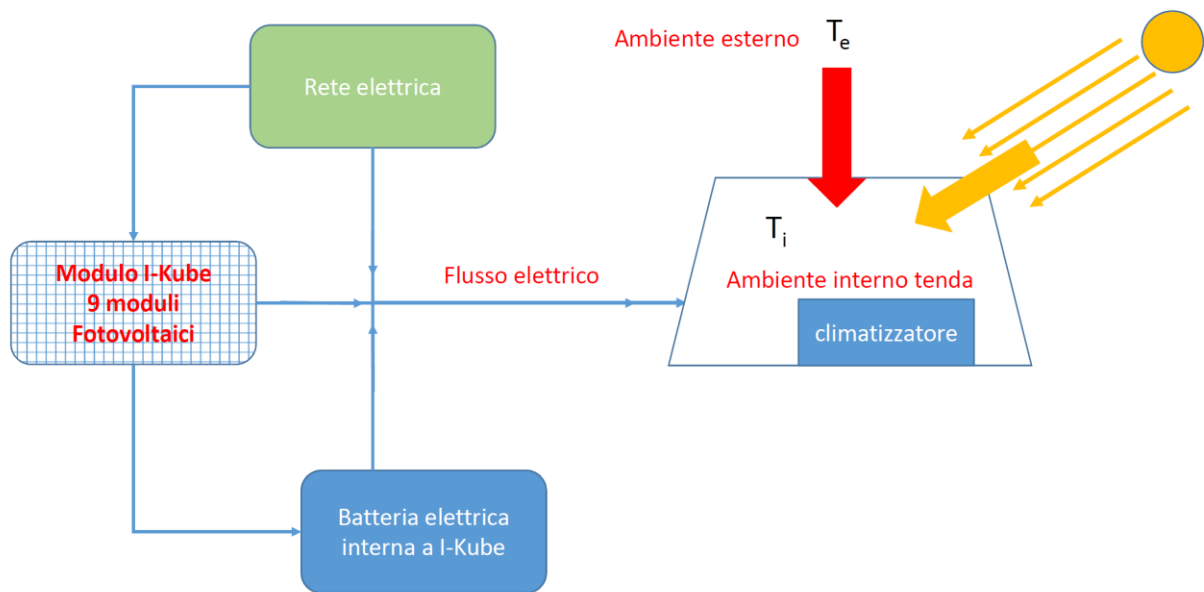


Fig. 3.11 Schema dei flussi elettrici

Come si può evincere dallo schema il flusso elettrico che fa funzionare il sistema di climatizzazione della tenda è determinato dal sistema di regolazione interno al I-Kube con la seguente modalità:

Il modulo I-Kube è collegato alla rete elettrica e quindi il flusso elettrico da essa proveniente può caricare la batteria di accumulo di cui è dotato il sistema. Questo avviene ad esempio di notte quando essendo assente la radiazione solare non può esserci la produzione di energia da fotovoltaico. Durante il giorno, in presenza di radiazione solare i moduli fotovoltaici producono energia elettrica che potrebbe non essere però sufficiente a soddisfare la richiesta del climatizzatore per questo, poiché il sistema elettronico di regolazione permette di fissare le priorità di sorgente di

alimentazione elettrica, nel caso della sperimentazione è stata fissata come sorgente prioritaria di integrazione la batteria di accumulo. Se anch'essa fosse insufficiente nel processo di integrazione interverrebbe la rete elettrica esterna.

La registrazione dei flussi, secondo quanto sopra descritto, avviene all'interno del I-Kube ed è reso visibile attraverso un display, ma per una registrazione automatica è stato predisposto un sistema di monitoraggio costituito da un PC collegato al sistema di regolazione del I-Kube e da un radiometro per la acquisizione dei dati di irraggiamento solare durante la sperimentazione (Figura 3.7)



Fig.3.12 Sistema di Monitoraggio

Capitolo 4 Analisi teorica

L'analisi teorica si basa sulla valutazione delle dispersioni termiche invernali e dei carichi termici estivi della tenda in funzione delle condizioni climatiche dell'ambiente esterno. Questi calcoli sono utili per valutare successivamente l'energia termica che il climatizzatore deve immettere nella tenda per mantenere costanti i valori della temperatura dell'ambiente interno quando i parametri ambientali esterni variano. A seguito di questa valutazione, tenendo conto dell'efficienza energetica del climatizzatore, si risale alla quantità di energia elettrica assorbita.

Tale energia può provenire dal sistema fotovoltaico o dalla rete e quindi, in funzione di ciò, può essere calcolata la quantità di CO₂ immessa in atmosfera per effetto della percentuale di energia elettrica di rete prodotta con le centrali termoelettriche che si trova nel mix elettrico nazionale.

La valutazione del comportamento energetico della tenda e del modulo abitativo è stata effettuata in un periodo di tempo che va dal mese di Febbraio a Giugno per avere tutte le condizioni ambientali che caratterizzano le stagioni invernale, estiva e quelle intermedie.

4.1 Calcolo dei carichi termici estivi

Un impianto di climatizzazione estiva deve mantenere nell'ambiente trattato condizioni termo-igrometriche adeguate. A tale scopo è necessario fornire all'ambiente, istante per istante, un flusso energetico di raffreddamento dell'aria Q (W) per contrastare sia flussi termici entranti nell'ambiente interno dall'ambiente esterno per differenza della temperatura e per assorbimento della radiazione solare, sia quelli dovuti alla presenza di generatori di calore interni quali individui e apparecchiature.

Più approfonditamente, i carichi termici esterni sono dovuti a:

- Flusso termico trasmesso attraverso l'involucro edilizio (pareti opache e pareti trasparenti)
- Flusso termico trasmesso per effetto dell'irraggiamento solare
- Flusso termico trasmesso attraverso i ponti termici
- Flusso termico dovuto ad infiltrazioni d'aria e ventilazione

I carichi termici interni sono dovuti a:

- Flusso termico associato alla presenza di persone
- Flusso termico associato alla presenza di macchinari
- Flusso termico associato alla presenza dell'impianto di illuminazione
- Flusso termico associato alla presenza di eventuali altri contributi.

4.2 Calcolo delle dispersioni termiche invernale

La dispersione termica invernale anche chiamata fabbisogno termico invernale viene indicata con il termine “fabbisogno termico invernale” dalla norma tecnica (UNI 12831- Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici), e viene calcolato effettuando un bilancio di energia termica.

Il fabbisogno termico rappresenta la potenza termica che l’impianto di riscaldamento deve fornire agli ambienti dell’edificio per assicurare le condizioni climatiche interne di comfort.

La valutazione del fabbisogno termico è effettuata calcolando, in condizione di regime stazionario, le potenze termiche in uscita dell’involucro avendo fissato le condizioni ambientali esterne e quelle di benessere termo-igrometrico.

Il fabbisogno termico infatti non rimane costante, ma cambia al mutare delle condizioni esterne ed interne e gli impianti, di conseguenza, devono poter modulare la fornitura energetica secondo la richiesta.

La potenza termica viene calcolata con la seguente relazione:

$$Q = U \cdot A(t_i - t_e) \cdot f$$

In cui:

t_i = temperatura interna

t_e = temperatura esterna

f= fattore di esposizione riportato nella tabella sottostante dipende dall'orientamento dell'edificio

prospetto NA.3 a Fattore di esposizione $a_k = a_f$

Fattore di esposizione $a_k = a_f$							
N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
1,20	1,20	1,15	1,10	1,00	1,05	1,10	1,15

A = area della superficie di scambio m^2

U = trasmittanza termica (o coefficiente globale di scambio termico $[W/m^2 K]$)

La trasmittanza termica risulta definita come flusso di calore $[W]$ che passa attraverso una struttura di $1 m^2$ di superficie e con una differenza di temperatura tra i lati della struttura stessa pari a $1 K$.

La trasmittanza termica delle superfici che separa l'ambiente riscaldato dall'ambiente esterno, è dato dal reciproco della sommatoria delle resistenze che si incontrano nella direzione del flusso termico.

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$R_T = R_{s_i} + \Sigma R_i + R_{s_e}$$

Dove R_{s_i} e R_{s_e} sono le resistenze termiche superficiali interna ed esterna, sono riportate nella UNI EN ISO 6946 e sono funzione della direzione del flusso e sono riportate nel caso di flusso verticale sia in fase ascendente che in fase discendente

come è possibile evincere dalla tabella di seguito riportata che è stata estratta dalla norma citata in precedenza:

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

E dove R_i rappresentano le resistenze termiche dei singoli strati sia omogenei che eterogenei.

Per materiali omogenei il valore si calcola dal rapporto tra lo spessore e la conducibilità termica (secondo la norma UNI 10351)

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Mentre per i materiali eterogenei si può ricavare direttamente la loro resistenza termica dalle tabelle riportate nella norma UNI 10355.

Un altro parametro preso in considerazione è la potenza termica per ventilazione, cioè per il rinnovo dell'aria negli ambienti per renderli salubri, che è data dalla seguente formula:

$$q = n V \rho C_p \Delta t$$

in cui :

n: corrisponde al numero di ricambi d'aria [vol/h]

V: volume interna del locale [m³]

ρ : densità dell'aria alla temperatura standard di 20°C [kg/m³]

C_p: calore specifico dell'aria [kJ/kg K]

Δt : differenza di temperatura tra l'aria interna e quella esterna [K]

Durante il periodo estivo il calcolo dei flussi entranti in ambiente per differenza di temperatura tra l'ambiente esterno, più caldo, e quello interno si valuta con le stesse relazioni utilizzate per il calcolo invernale. A queste, però, a differenza del periodo invernale, si somma l'energia entrante in ambiente per effetto di assorbimento della radiazione solare da parte della superficie esterna dell'involucro, in funzione del coefficiente di assorbimento caratterizzante la superficie stessa. A tutti questi poi, si devono sommare i carichi sia sensibili che latenti dovuti alla presenza di corpi umani e di apparecchiature calde.

Per il calcolo dei carichi termici occorre conoscere:

- Temperatura dell'aria
- Umidità relativa dell'aria
- Velocità del vento
- Radiazione solare

Per ciascun mese dell'anno, si fa riferimento ad un andamento orario giornaliero rappresentativo delle grandezze climatiche e si definisce il cosiddetto giorno medio

mensile: è un giorno fittizio i cui valori dei parametri suddetti sono stati determinati come media di quelli misurati per un lungo periodo, statisticamente significativo.

Per la valutazione dei fabbisogni energetici della tenda e del modulo abitativo sono stati eseguiti i calcoli numerici adottando fogli Excel, considerando le seguenti condizioni al contorno:

- In inverno il calcolo delle dispersioni è effettuato in regime stazionario, le condizioni più gravose per l'impianto si hanno in assenza di irraggiamento solare, non si considera l'accumulo, l'irraggiamento solare, costituisce al pari dei carichi termici un apporto di calore all'ambiente, che compensa in parte il carico termico;
- poiché la temperatura media esterna è sensibilmente diversa dalla temperatura interna e le sue oscillazioni intorno al valor medio sono contenute si fa l'ipotesi cautelativa che la temperatura esterna sia costante ed assuma il valore minimo.
- Le condizioni più gravose si hanno in assenza di irraggiamento solare
- Non si considera l'accumulo delle strutture.

Per valutare il comportamento energetico dell'involucro esterno della tenda è stato necessario calcolare il coefficiente globale di trasmissione termica della stratificazione secondo quanto riportato nella tabella che segue.

descrizione	densità [kg/m ³]	spessore [m]	conducibilità [W/mK]	resistenza termica [m ² K/W]
Strato liminare interno				0.130
PVC	1400	0.001	0.16	0.006
COTONE	2000	0.001	0.04	0.025
POLIESTERE	2000	0.001	0.5	0.002
				0.180
				0.000
				0.000
				0.000
				0.000
				0.000
				0.000
Strato liminare esterno				0.040

Rt [m ² K/W]	0.383
U [W/m ² K]	2.609

massa [kg/m ²]	5.400
----------------------------	-------

Attraverso questo valore si sono sviluppati i calcoli termici per la valutazione del comportamento energetico della tenda sia in regime invernale che in quello estivo.

Per i quali si riportano le tabelle che seguono prodotte per i mesi nei quali le condizioni climatiche esterne richiedono l'ausilio del sistema di riscaldamento e cioè l'uso del radiatore o della pompa di calore. In particolare si riportano i risultati per i mesi di Febbraio, Marzo, Aprile e Maggio.

Calcolo invernale:

ore	ΔT	FEBBRAIO
	[°C]	potenza termica [W]
0	13.6	3588.89
1	13.8	3641.66
2	13.9	3668.05
3	14	3694.44
4	14.1	3720.83
5	14.2	3747.22
6	14.3	3773.61
7	14.3	3773.61
8	14	3694.44
9	13.6	3588.89
10	13	3430.55
11	12.5	3298.61
12	12.2	3219.44
13	11.8	3113.89
14	11.6	3061.11
15	11.5	3034.72
16	11.4	3008.33
17	11.7	3087.50
18	12.2	3219.44
19	12.9	3404.16
20	13.1	3456.94
21	13.2	3483.33
22	13.3	3509.72
23	13.4	3536.11

ore	ΔT	MARZO
	[°C]	potenza termica [W]
0	11.5	3034.72
1	11.9	3140.28
2	12	3166.66
3	12	3166.66
4	12.1	3193.05
5	12.2	3219.44
6	12.3	3245.83
7	12.5	3298.61
8	12.1	3193.05
9	11.6	3061.11
10	10.8	2850.00
11	10.4	2744.44
12	10.2	2691.66
13	10	2638.89
14	9.9	2612.50
15	9.9	2612.50
16	9.9	2612.50
17	10.1	2665.28
18	10.4	2744.44
19	10.8	2850.00
20	11	2902.78
21	11.2	2955.55
22	11.3	2981.94
23	11.4	3008.33

ore	ΔT	APRILE
	[°C]	potenza termica [W]
0	8.5	2243.05
1	8.4	2216.67
2	8.5	2243.05
3	8.6	2269.44
4	8.7	2295.83
5	8.8	2322.22
6	8.9	2348.61
7	9	2375.00
8	8.5	2243.05
9	7.7	2031.94
10	6.5	1715.28
11	6	1583.33
12	5.7	1504.17
13	5.5	1451.39
14	5.4	1425.00
15	5.4	1425.00
16	5.6	1477.78
17	5.9	1556.94
18	6.3	1662.50
19	6.8	1794.44
20	7.2	1900.00
21	7.6	2005.55
22	8.1	2137.50
23	8.3	2190.28

ore	ΔT	MAGGIO
	[°C]	potenza termica [W]
0	4.5	1187.50
1	4.8	1266.67
2	5	1319.44
3	5.3	1398.61
4	5.6	1477.78
5	5.7	1504.17
6	5.7	1504.17
7	5.6	1477.78
8	5	1319.44
9	4.1	1081.94
10	3	791.67
11	2.6	686.11
12	2.4	633.33
13	2.5	659.72
14	2.3	606.94
15	2.1	554.17
16	1.9	501.39
17	2	527.78
18	2.1	554.17
19	2.3	606.94
20	2.8	738.89
21	3.3	870.83
22	4.1	1081.94
23	4.4	1161.11

Come detto nella trattazione teorica, in estate il calcolo degli apporti di calore in ambiente deve essere effettuato in regime variabile, essendoci la contemporanea azione dell'irraggiamento solare e del livello di temperatura dell'ambiente esterno.

Più in particolare:

La temperatura dell'aria esterna varia nell'arco della giornata ed assume un andamento sinusoidale e l'entità dell'oscillazione è dello stesso ordine di grandezza della

differenza tra la temperatura media esterna e la temperatura dell'ambiente interno, occorre tener conto di tale variabilità.

- L'irraggiamento solare è il carico predominante e varia nell'arco della giornata
- La radiazione solare è assorbita dalle strutture, che accumulano calore e lo restituiscono all'ambiente in tempi successivi.

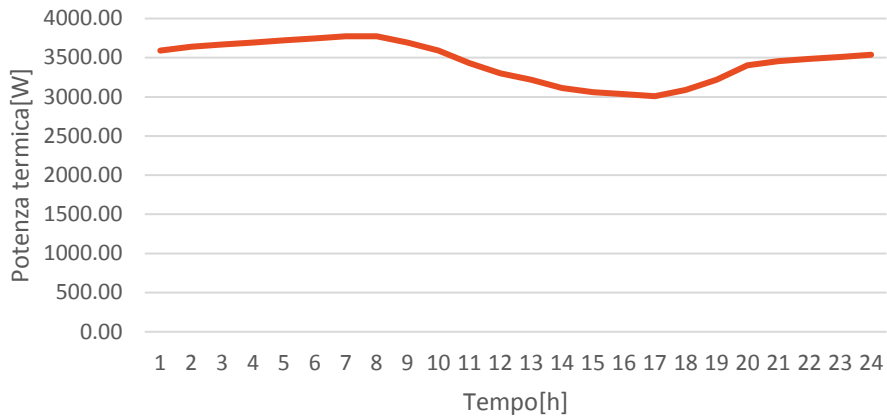
RISULTATI [W]

ora	Trasmissione su superficie opache	Trasmissione su superfici trasparenti	Apporti solari	carichi interni Persone - sensibile	carichi interni Persone - latente	carichi interni illuminazione	carichi interni apparecchiature	ventilazione sensibile	ventilazione latente	TOTALE Sensibile	TOTAL E latente	TOTAL E
6	-878	0	0	384	246	36	0	-6	140	-464	386	-78
7	-468	0	0	384	246	36	0	-10	132	-58	378	320
8	-249	0	0	384	246	36	0	-13	126	157	372	529
9	28	0	0	384	246	36	0	-16	122	433	368	800
10	248	0	0	384	246	36	0	-17	114	651	360	1,011
11	360	0	0	384	246	36	0	-15	104	764	350	1,114
12	531	0	0	384	246	36	0	-12	104	940	350	1,290
13	797	0	0	384	246	36	0	-5	111	1,212	357	1,570
14	1,023	0	0	384	246	36	0	5	117	1,448	363	1,811
15	1,193	0	0	384	246	36	0	16	140	1,629	386	2,015
16	1,291	0	0	384	246	36	0	29	167	1,740	413	2,153
17	1,260	0	0	384	246	36	0	42	194	1,721	440	2,161
18	986	0	0	384	246	36	0	51	206	1,457	452	1,909
19	711	0	0	384	246	36	0	57	220	1,188	466	1,653
20	361	0	0	384	246	36	0	59	225	840	471	1,311
21	96	0	0	384	246	36	0	57	211	572	457	1,029

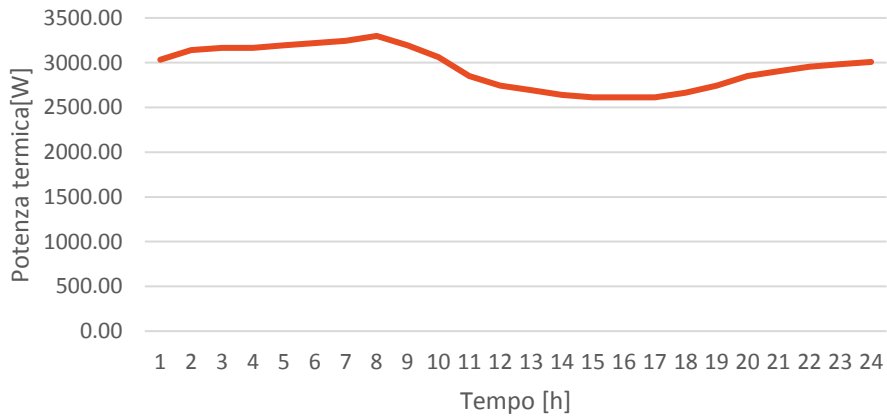
I dati registrati sui fogli Excel sono stati elaborati in forma grafica per visualizzare la variazione del flusso energetico richiesto al climatizzatore durante le ventiquattro ore di una giornata caratterizzante il mese preso in considerazione.

Nelle figure seguenti si mostrano gli andamenti dei mesi compresi nell'intervallo Febbraio-Giugno.

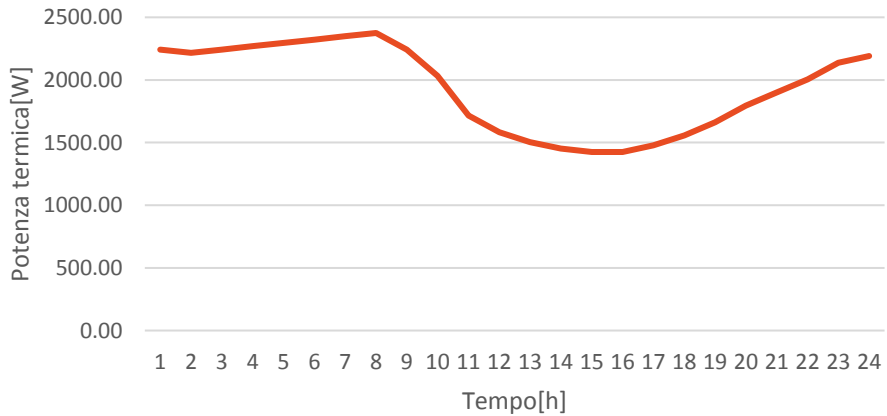
Andamento della potenza termica fabbisogno giornaliero del mese di Febbraio



Andamento della potenza termica fabbisogno giornaliero mese di Marzo



Andamento della potenza termica fabbisogno giornaliero del mese di Aprile



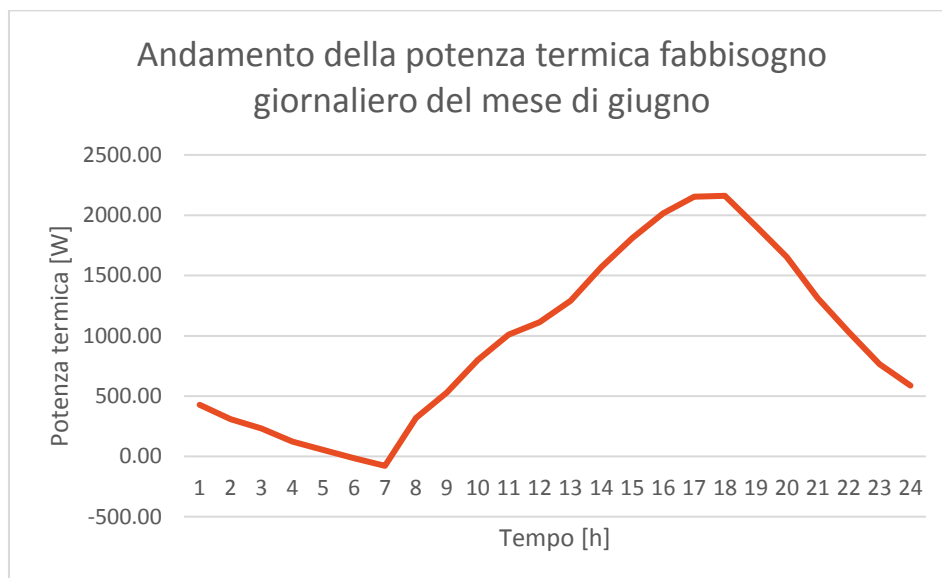
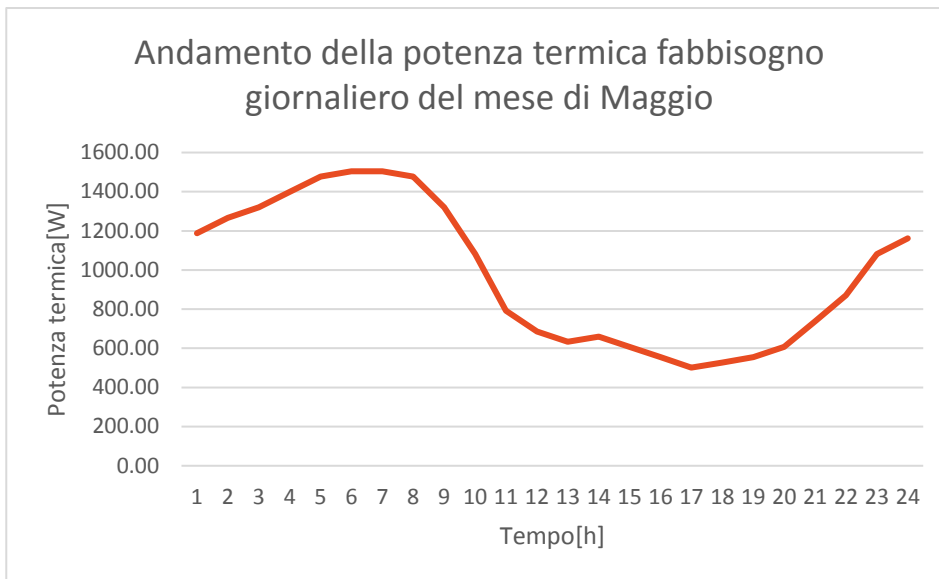
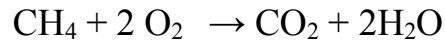


Fig.4.1 Andamento delle potenze termiche di fabbisogno energetico dei mesi considerati

4.3 Metodi utilizzati per calcolare e quantificare le emissioni di CO₂

Come è noto la reazione esotermica di combustione del gas metano determina la produzione di acqua, sotto forma di vapore, una quantità di CO₂ e naturalmente calore.



Per l'individuazione del coefficiente utile al calcolo delle emissioni di CO₂ legate al consumo di combustibile metano si è fatto riferimento alla tabella inventario nazionale UNFCCC dei coefficienti delle emissioni di CO₂ (Fonte dati ISPRA 2019)

che prendono in considerazione il mix energetico nazionale.

Da tale studio si evince che per il calcolo delle emissioni legate al consumo/ produzione di energia elettrica riferita al mercato italiano, il mix energetico nazionale relativo al 2019 è da considerarsi pari a 0.367 kg CO₂/kWh.

Ai fini della valutazione delle emissioni di CO₂ sono state prese in esame due tipologie impiantistiche:

- pompa di calore
- impianto fotovoltaico

per le quali si è calcolato il consumo elettrico e la mancata emissione di CO₂

La produzione di un kWh elettrico può essere fatta utilizzando diverse fonti d'energia, ogni fonte può essere caratterizzata da un fattore che indica quanti kg di CO₂ vengono immessi nell'atmosfera per produrre 1 kWh elettrico (questi fattori hanno delle variazioni che dipendono dall'efficienza della singola centrale e da quella

della rete di distribuzione).

Alcune delle fonti d'energia sono: petrolio, gas naturale, carbone, rifiuti urbani (termoelettriche), uranio arricchito (nucleari), dislivelli d'acqua (idroelettriche), calore della terra (geotermiche), vento (eoliche), sole (fotovoltaiche, solari termici), biomassa, ecc.

Ogni nazione possiede un mix di centrali elettriche che utilizzano diverse fonti d'energia, quindi il valore dei kg CO₂/kWh sarà diverso per ogni nazione, questo fattore può essere utilizzato per calcolare i kg CO₂ di emissioni evitate nell'ambiente nel paese in cui è installato l'impianto PV.

Il gas CO₂ presente nell'atmosfera è la principale causa dell'effetto serra che influisce direttamente sull'aumento della temperatura terrestre e sui cambiamenti climatici correlati.

I grammi di CO₂ emessi per ogni kWh elettrico prodotto, dipende dal mix di fonti energetiche utilizzate per produrre energia elettrica nel caso dell'Italia vale 531 CO₂ g/kWh.

Per produrre 1 kWh elettrico ne vengono bruciati mediamente l'equivalente di 2.56 kWh sotto forma di combustibili fossili di conseguenza emessi nell'aria circa 0.53 kg di CO₂. (fattore di emissione del mix elettrico italiano alla distribuzione)

Quindi ogni kWh prodotto dal sistema fotovoltaico evita l'emissione di 0.53 kg di anidride carbonica.

L'emissione di CO₂ evitata si calcola moltiplicando il valore dell'energia elettrica prodotta dai sistemi per il fattore di emissione del mix elettrico.

Formula per il risparmio di CO₂:

energia elettrica in kWh x fattore risparmio CO₂ in kg/kWh = risparmio di CO₂ in kg.

4.4 Calcolo della potenza installata

In modalità teorica avendo calcolato la potenza installata dal sistema fotovoltaico

con la seguente formula:

$$PPV = P * f \left(\frac{GT}{GT_{STC}} \right) * (1 + \alpha_p (T_c - T_{cstc}))$$

quest'ultima tiene conto della potenza massima di ciascun pannello, del rendimento complessivo del sistema, della radiazione solare misurata e quelle in condizioni standard e dal coefficiente di temperatura per la potenza.

Le condizioni standard, riportate nelle schede tecniche dei pannelli fotovoltaici, sono:

- irraggiamento specifico di 1000 W/m²
- temperatura cella di 25°C
- AIR MASS di 1.5, ovvero l'assorbimento di specifiche lunghezze d'onda di un'altezza pari a 1.5 volte l'altezza media dell'atmosfera

Il coefficiente di Temperatura per la Potenza (α_p), indicato sulle schede tecniche come [%/°C]. È un coefficiente negativo e in pratica indica la percentuale di diminuzione della potenza all'aumento di 1 grado di temperatura. Più basso è il coefficiente migliore è il pannello.

Mentre per calcolare la temperatura operativa della cella si considera la temperatura dell'aria, la radiazione solare misurata, NOCT (Normal Operating Cell Temperature) temperatura operativa della cella, parametro importante in quanto indica la capacità della cella di smaltire il calore, in condizioni operative normali di un pannello

(temperatura di funzionamento che fa riferimento a temperatura dell'aria $T_a=25^{\circ}\text{C}$ e irraggiamento $1000\text{W}/\text{m}^2$).

$$T_c = T_a + G_t * \left(\frac{NOCT-20}{800} \right)$$

Questi due parametri sono stati calcolati per tutti i giorni di ciascun mese da febbraio a giugno, successivamente si sono presi come riferimento due giorni di ciascun mese uno in cui si registravano i valori minimi di radiazione solare e uno con valori di massima radiazione.

I dati della radiazione solare sono stati presi dal software europeo PVGIS.

PVGIS è un simulatore online che permette, inserendo alcuni dati sulla località e sull'impianto, di effettuare un veloce calcolo della produzione media che l'impianto fotovoltaico potrà avere negli anni.

Sono stime realistiche perché si basano su dati attendibili, basati ovviamente su dati empirici, contenenti i dati di irraggiamento e di produttività per tipo di pannello fotovoltaico, per tipo e per zona di installazione. Il simulatore PVGIS è aggregato ad una mappa interattiva curato dall'ESTI, European Solar Test Installation, laboratorio e centro di ricerca della Commissione Europea sul fotovoltaico.

Il simulatore PVGIS restituisce stime di produzione da fotovoltaico molto vicine ai reali dati di produzione registrati empiricamente. Il simulatore PVGIS è quindi un buon indicatore dell'energia "minima" producibile dagli impianti fotovoltaici.

4.5 Calcolo dell'autonomia del sistema I-Kube

Conoscendo la potenza prodotta dal fotovoltaico, l'assorbimento necessario e la capacità delle batterie di cui il cubo è fornito si è andato a valutare l'autonomia del sistema.

Partendo dalla mezzanotte e per l'intera durata della giornata si è analizzato ora per ora il contributo di energia fornito dal fotovoltaico, dalla batteria e dalla rete e la percentuale per ciascuna quota nell'arco dell'intera giornata.

Di seguito si riportano i grafici dell'autonomia del sistema e il calcolo ambientale:

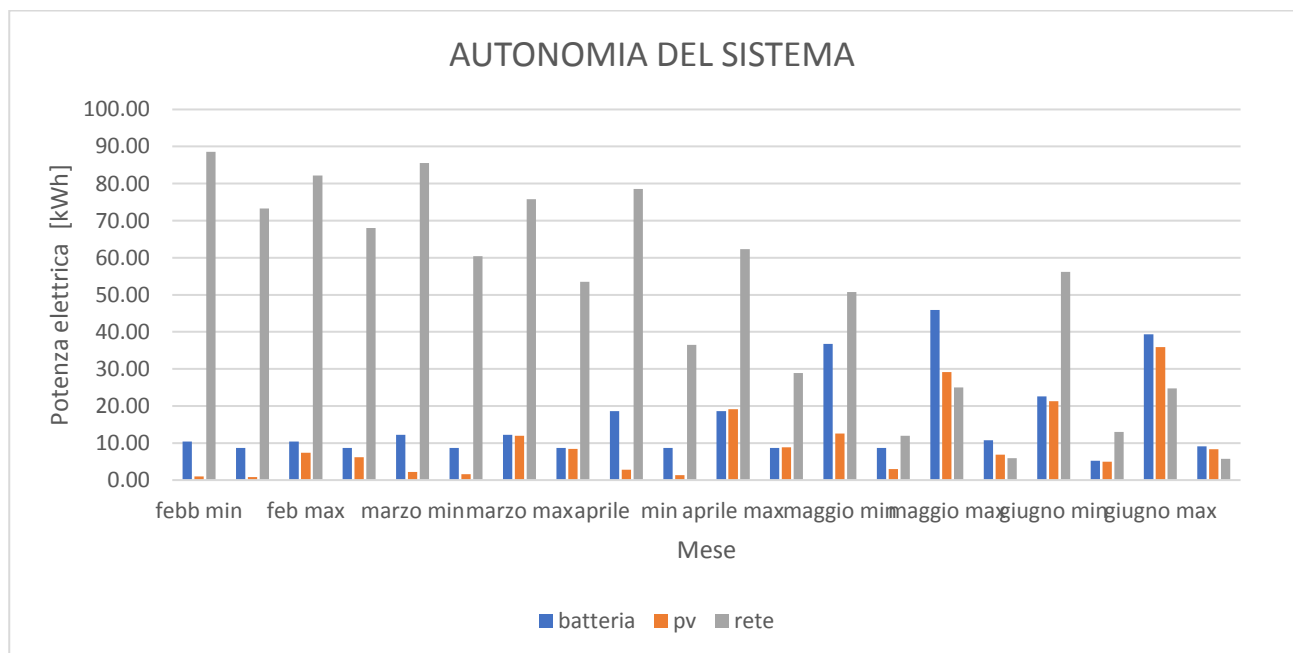


Fig. 4.2 Potenze elettriche acquisite dalle tre sorgenti (FV, rete, batteria) nei mesi considerati

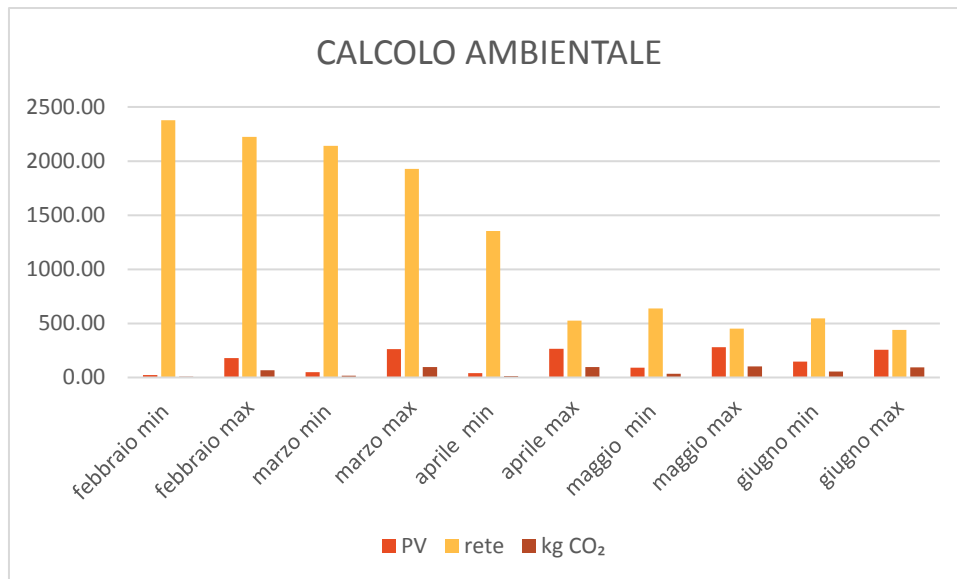


Fig 4.3 Quantità di CO₂ emessa in ambiente espressa in kg/KWh da ciascuna delle tre sorgenti

È stato effettuato il calcolo ambientale prendendo in considerazione la quota del fotovoltaico e quota rete e moltiplicando per i giorni di ciascun mese così da avere la produzione mensile.

Risultati

	febbraio min	febbraio max	marzo min	marzo max	aprile min	aprile max	maggio min	maggio max	giugno min	giugno max
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
PV	23.16	177.80	48.48	261.64	39.25	265.81	91.44	278.84	147.87	256.77
rete	2376.75	2222.11	2139.82	1926.66	1353.29	525.01	637.45	450.05	547.28	438.38
kg CO ₂	8.51	65.31	17.81	96.11	14.42	97.64	33.59	102.43	54.32	94.32

4.6 calcolo del COP della pompa di calore e del dispendio energetico giornaliero e mensile

La pompa di calore può svolgere la funzione di climatizzazione dell'edificio e quindi soddisfare sia i bisogni correlati al raffrescamento e quelli del riscaldamento invernale.

Questa macchina ha bisogno di una quantità minima di energia elettrica

Per capire quanto assorbe istantaneamente una pompa di calore si deve fare riferimento al COP (coefficiente di prestazione).

Il COP è il dato che permette di calcolare l'efficienza effettiva di una pompa di calore e si ottiene calcolando il rapporto tra l'energia termica resa all'ambiente da climatizzare e l'energia elettrica assorbita dal compressore.

Esso dipende dalle condizioni di funzionamento.

Maggiore è il valore del COP associato alla pompa di calore più alto sarà il rendimento della stessa e di conseguenza il risparmio energetico.

$$\text{COP} = \frac{\text{kW termici}}{\text{kW elettrici}}$$

$$\text{kW elettrici} = \frac{\text{kW termici}}{\text{COP}}$$

Da questi valori si è definito il dispendio energetico giornaliero e mensile.

Essendo la pompa di calore una macchina che assorbe energia termica da fonti esterne (aria, acqua e suolo) i consumi dipendono anche dalla rigidità delle condizioni climatiche esterne.

Per l'utilizzo del radiatore elettrico invece avendo ricavato l'energia termica, effettuando la sommatoria di tutti questi valori si ricaverà l'energia totale a fine giornata per riscaldare.

Conoscendo il potere calorifico del metano e la sommatoria dei kWh necessari a fine giornata si ricavano i m³ di metano da usare in una giornata.

Conoscendo il rendimento della caldaia equivalente a 0.9 si va quindi a verificare i m³ di metano da fornire alla caldaia perché possa riscaldare.

Avendo calcolato anche il dispendio giornaliero dato dalla somma dell'energia termica e l'energia elettrica.

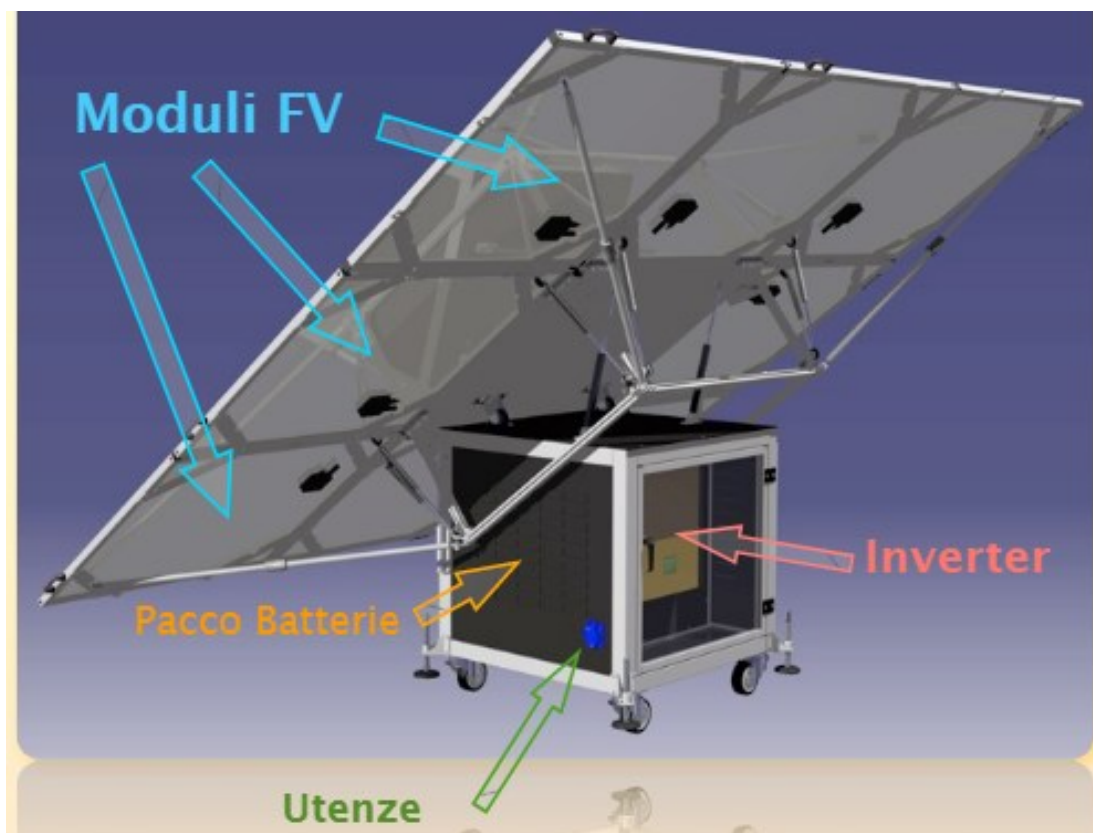
5 Fase sperimentale

5.1 Funzionamento del sistema cubo

Il sistema può funzionare da fotovoltaico con accumulo in batteria oppure da rete.

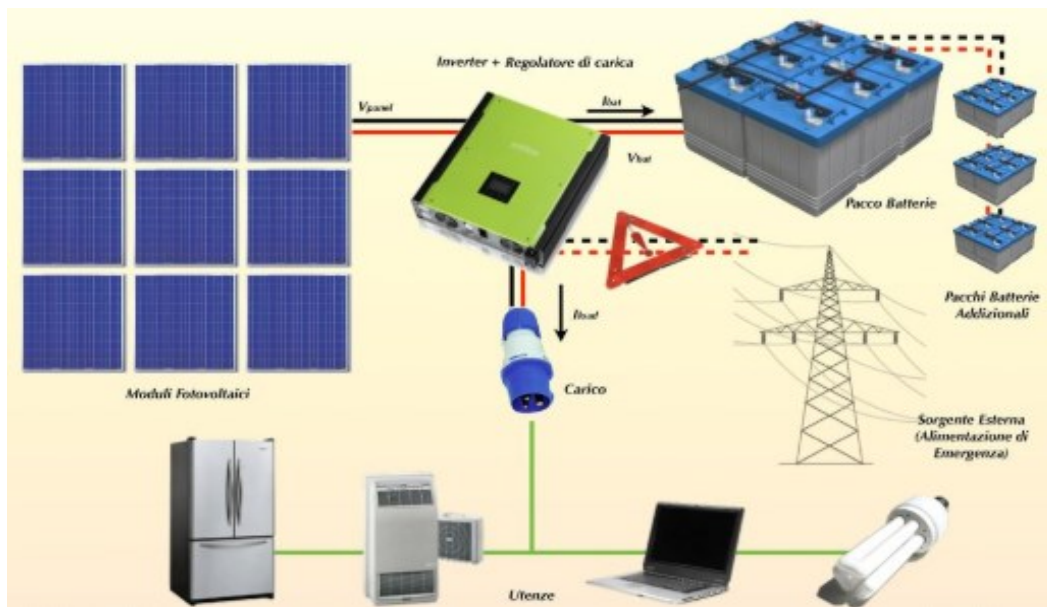
Il generatore fotovoltaico, impianto stand-alone è composto da:

pannelli solari, un inverter, un regolatore di carica e varie batterie di accumulo.



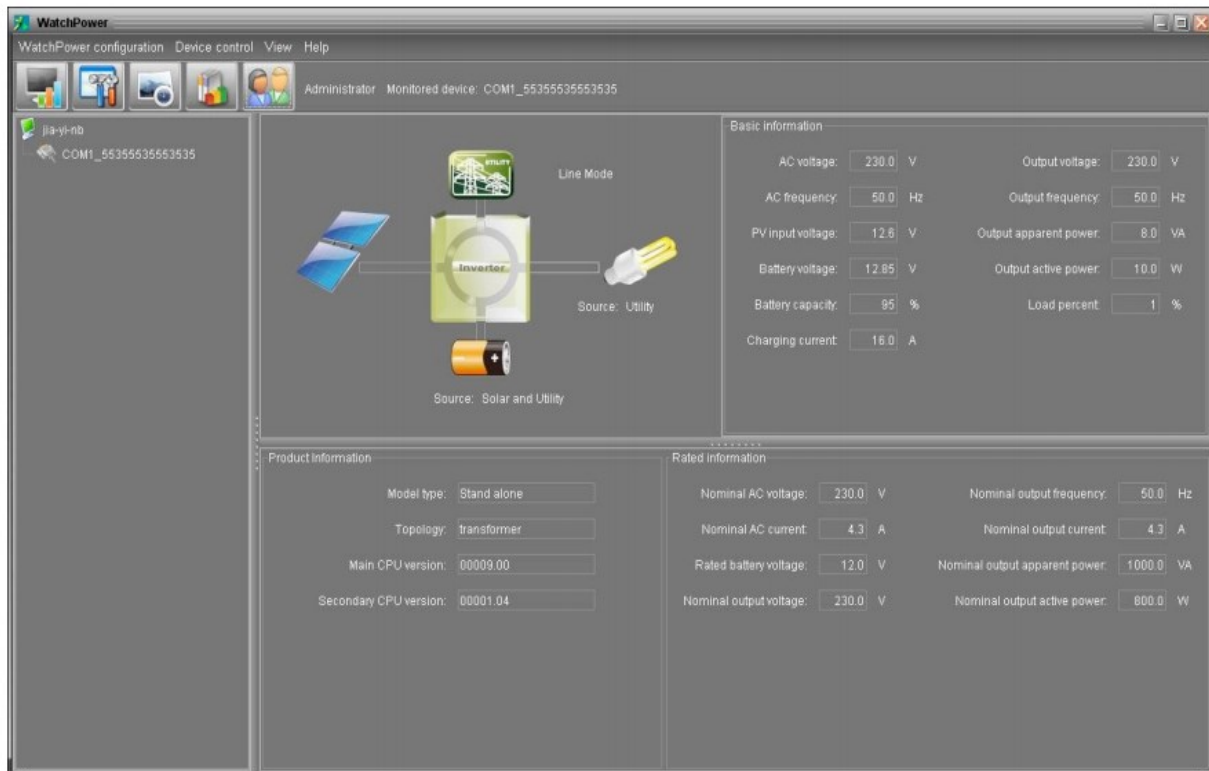
I moduli fotovoltaici producono corrente continua e la inviano tramite il regolatore di carica e la batteria, all'inverter, che la trasforma in corrente alternata pronta per essere utilizzata. Alle batterie il compito di conservare l'energia elettrica.

Schema circuito di funzionamento:



L'energia prodotta dai moduli fotovoltaici passa per l'inverter che a sua volta permette di caricare i pacchi batterie ed ad alimentare le utenze.

Configurazione software Watch Power:



Collegando l'inverter ad un computer è possibile visualizzare e impostare le modalità di utilizzo si avranno le informazioni della tensione CA, frequenza CA, tensione in ingresso del fotovoltaico, capacità della batteria, corrente di carica, tensione di uscita, frequenza di uscita, potenza apparente di uscita, potenza attiva e percentuale di carico.



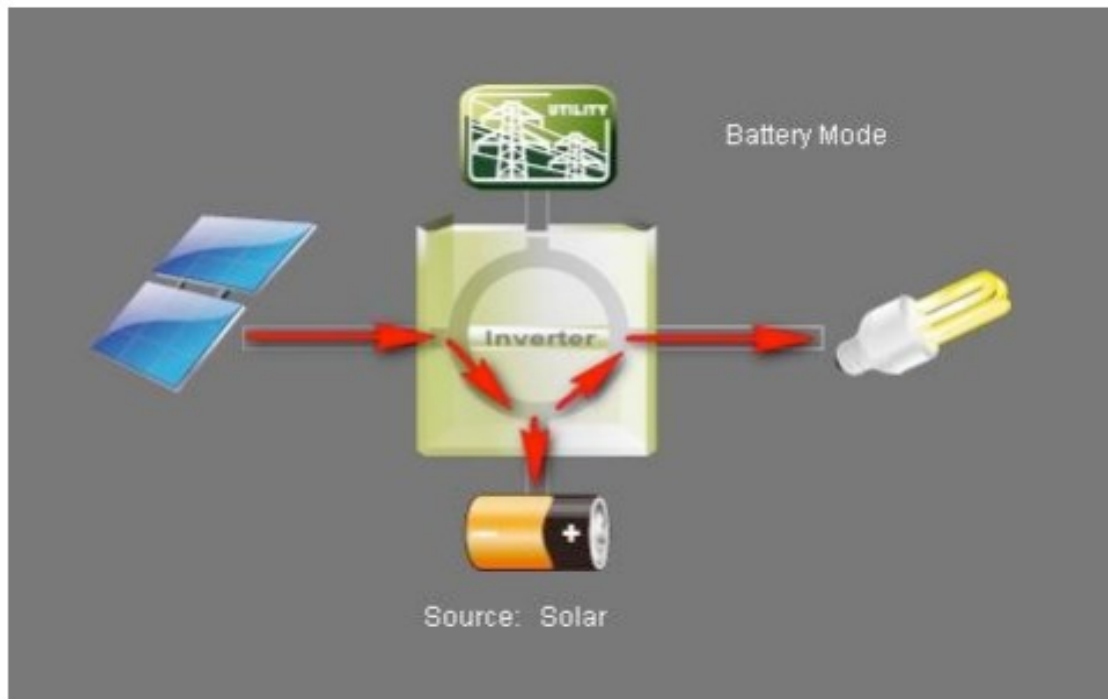
Ci sono cinque icone di dispositivi:

pannello solare, batteria, inverter, carico e altre utenze.

Da queste icone è possibile visualizzare il flusso dinamico dell'alimentazione.

Si possono scegliere le priorità di fonte di energia:

- Prima da rete
- Prima da solare
- Solare e rete



Modalità Batteria

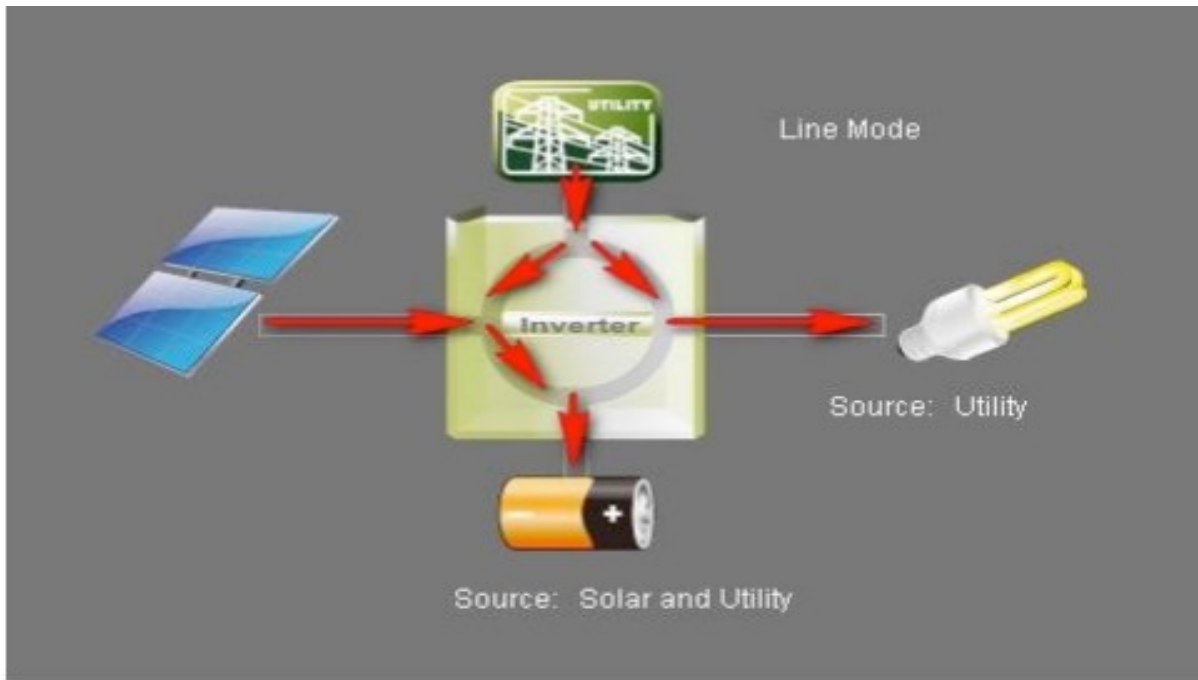
Modalità batteria: l'inverter alimenta il carico dalla batteria o pannello fotovoltaico.

Modalità risparmio energetico:

Se viene disattivato, l'output rimarrà acceso continuamente quando il dispositivo lavora in modalità batteria.

Se viene attivato l'output sarà acceso in modo intermittente per rilevare se c'è un carico connesso.

Se il carico viene rilevato, l'inverter fornirà la potenza in uscita, mentre se il carico non viene rilevato, l'uscita dell'inverter sarà spenta fino a quando il carico non raggiunge un certo livello.



Modalità Lineare

In questa modalità l'inverter alimenterà il carico direttamente dalla rete.

Linea 230 V da gestore rete, generatore o pannelli FV possono ricaricare le batterie.

È possibile raccogliere i dati dell'inverter salvati nelle schede tecniche ed esportarli e salvare la tabella dati.

L'intervallo di aggiornamento pagina da 5 a 600 secondi.

L'impostazione di default è di 5 secondi.

Intervallo scansione dispositivi che determinerà il tempo per scansionare i dispositivi connessi.

Intervallo di registrazione determinerà il tempo di registrazione nel database dei dati di monitoraggio degli inverter. L'impostazione è di una ogni 60 secondi.

5.2 Prova sperimentale

Sono state effettuate alcune prove per verificare l'autonomia del sistema si è collegato al cubo come utenza esterna il radiatore elettrico e si è visto nell'arco della giornata quanto questo fosse alimentato da fotovoltaico e nelle ore notturne dalle batterie precaricate nell'arco della giornata e dalla rete.



Fig. 5.1 Il generatore fotovoltaico durante le misure effettuate nel mese di giugno.

In basso a destra il piranometro per la misura della radiazione solare

All'inverter è stato collegato un computer che ha permesso di registrare i dati della tensione di ingresso da fotovoltaico e la corrente di ingresso da fotovoltaico,

la potenza apparente di uscita, la potenza attiva di uscita, la capacità della batteria, la corrente di carica, corrente di scarica della batteria, la tensione di uscita e la frequenza di uscita.

Dai dati registrati dallo strumento è stato possibile effettuare il grafico dell'andamento della potenza in funzione del tempo.

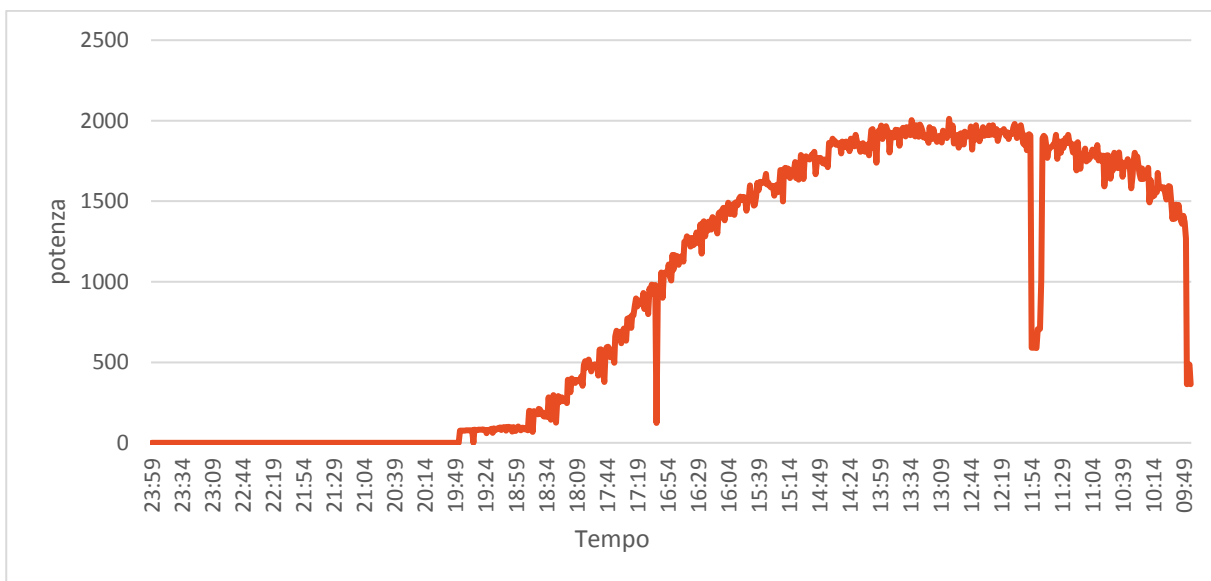


Fig. 5.2 Andamento giornaliero della potenza elettrica dal generatore fotovoltaico

Conclusioni

Come detto nella parte iniziale della tesi l'obiettivo del lavoro era quello di analizzare il funzionamento di un sistema fotovoltaico trasportabile applicato ad una tenda e ad un container per uso abitativo della Protezione Civile. In particolare ci si proponeva di valutare la percentuale di flusso elettrico prodotto dalle celle fotovoltaiche per il soddisfacimento della richiesta energetica per la climatizzazione delle due tipologie abitative e di conseguenza di valutare in un determinato periodo di tempo la quantità di gas serra CO₂ risparmiata dall'emissione in atmosfera. Il metodo di analisi utilizzato ha visto una prima fase di tipo teorico nella quale i comportamenti energetici del generatore fotovoltaico simulato sono stati calcolati attraverso l'uso di dati climatici rilevati dal software europeo PVGIS. Successivamente sono stati calcolati, nelle stesse condizioni climatiche le potenze elettriche necessarie a soddisfare le richieste di climatizzazione all'interno di due unità abitative adottate dalla Protezione Civile, alimentando due tipologie di climatizzatori: il primo un radiatore elettrico ad olio per il solo riscaldamento invernale ed il secondo, una pompa di calore ad inversione ciclo nelle quattro stagioni dell'anno.

Successivamente a questa prima fase, con lo scopo di validare i risultati teorici, è stata realizzata una campagna sperimentale che ha visto il monitoraggio dei flussi energetici provenienti dal generatore FV, dalle batterie, dalla rete. Da questa indagine si è potuto osservare che gran parte dell'energia utilizzata dai sistemi di climatizzazione è fornita dalla rete, soprattutto nei mesi invernali in quanto il fotovoltaico ne riesce a produrre una percentuale molto bassa. Anche durante il periodo estivo la quantità di energia

elettrica utilizzata da fonte fotovoltaica non ha mai superato il 30% della quantità utilizzata dai climatizzatori.

È stato verificato che anche le batterie in dotazione del modulo fotovoltaico hanno un'autonomia molto breve, infatti, avendo precaricato da rete le batterie al termine di una giornata le batterie hanno soddisfatto la richiesta energetica per la climatizzazione durante il periodo notturno per non più di 3 ore a seguito delle quali è intervenuta la rete elettrica nazionale fino al raggiungimento di una radiazione solare capace di innescare il processo fotovoltaico. Pertanto si può concludere che il generatore fotovoltaico scelto dalla Protezione Civile in caso di calamità, avrebbe una efficacia piuttosto limitata rispetto alla già limitata quantità di fabbisogno di energia per l'alloggiamento di otto persone.

Di seguito a questi risultati, dovendo considerare eventuali sviluppi futuri della ricerca, si dovrebbe quantizzare la quantità di risorse ambientali necessarie per la costruzione del generatore fotovoltaico utilizzando il metodo del Life Cycle Assessment e quindi l'ammortamento delle risorse ed economico nel periodo di vita del generatore stesso.

Bibliografia

1. T. Papa “Lezioni di fisica e termodinamica” edizione Kappa, Roma
2. [pompa di calore.pdf](#)
3. Manuale tecnico per l’allestimento delle aree di ricovero per strutture prefabbricate di Protezione Civile
4. Rapporto ISPRA 2020: Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali paesi europei
5. Sinanet.isprambiente.it: Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia
6. Calcolo carichi termici: manuale della climatizzazione, tecniche nuove
7. www.gse.it
8. www.enea.it
9. <http://www.qualenergia.it>
10. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP Photovoltaic Geographical Information System
11. Rivista La Protezione Civile italiana
12. Francesco Groppi-Carlo Zuccaro – Impianti solari fotovoltaici a norme CEI Editore Delfino Ed.2004
13. Cinzia Buratti Impianti di climatizzazione e condizionamento editore Morlacchi Ed.2007

14. Gaetano Alfano, Francesca Romana d'Ambrosio, Filippo de Rossi –

Fondamenti di benessere termoigrometrico per la progettazione e la gestione degli impianti di condizionamento Ed. CUEN ,1987

15. CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche -Dati climatici per la progettazione edile ed impiantistica