

14

**PROGETTAZIONE IMPIANTI TECNOLOGICI**

dott. ing. Agide Maria BORELLI

Via Natta, 12 - ASTI

tel. 0141/599576 - fax. 0141/595577 e-mail: posta@isiasti.it

---

COMUNE DI REVIGLIASCO

Provincia di Asti

***REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE FOTOVOLTAICO***

***"GRID CONNECTED"***

***REGIME GSE DI VENDITA IN CONTO ENERGIA II***

***(d.m. 19 febbraio 2007)***

***POTENZA = 709,32 kWp TRIFASE***

***VALUTAZIONE LEGGE REGIONALE n.40 14 dicembre 1998***

IL COMMITTENTE: **ANNIDILUCE S.R.L. - Via G.B. GIULIANI, 4/6 - ASTI**

IL PROGETTISTA: **ING. AGIDE MARIA BORELLI - VIA NATTA 12 - ASTI**

18 Aprile 2008



## **SOMMARIO**

### **1. QUADRO PROGRAMMATICO**

*1.1 FINALITA' E MOTIVAZIONI DELL'OPERA*

*1.2 RAPPORTO TRA COSTI PREVENTIVATI E BENEFICI STIMATI*

### **2. QUADRO PROGETTUALE**

*2.1 SOLUZIONI ALTERNATIVE*

*2.2 CARATTERISTICHE TECNOLOGICHE DELL'IMPIANTO E SOLUZIONI TECNICHE SCELTE*

*2.3 LO SMALTIMENTO ED IL RICICLAGGIO DEI COMPONENTI DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO*

*2.4 EFFETTO "SPECCHIO"*

**ALLEGATO**

Tesi di Dottorato di Ricerca dell'Ing. Morgano

## 1. QUADRO PROGRAMMATICO

### 1.1 FINALITA' E MOTIVAZIONI DELL'OPERA

La presente opera consiste nella realizzazione di un impianto fotovoltaico a terra con potenza nominale di picco di circa **710,00kW**. Tale opera ha come finalità la produzione di energia elettrica da una fonte rinnovabile in quantità di circa **900.000 kWh annui**, energia che immessa sulla rete nazionale eviterà emissioni di CO<sub>2</sub> pari a **607.000 kg/anno** che, considerando la vita media dell'impianto di 20 anni, eviterà emissioni di CO<sub>2</sub> pari a **12.140,00 tonnellate** ed un risparmio di **4135.00 tonnellate** di petrolio. L'energia elettrica prodotta ed immessa in rete sarà ceduta all'Enel in base al regime di vendita totale previsto dal D.M. 19 febbraio 2007.

### 1.2 RAPPORTO TRA COSTI PREVENTIVATI E BENEFICI STIMATI

Il rapporto tra costi preventivati e benefici stimati risulta ovviamente vantaggioso per la società proponente, caposaldo per la realizzazione dell'opera. Aderendo al regime di vendita totale previsto dal D.M. 19 febbraio 2007, si venderà l'energia prodotta ad un valore pari a circa 2,5 volte il valore con cui l'Enel fattura energia elettrica a tutti i suoi utenti. Il contratto di immissione sulla rete nazionale avrà durata di 20 anni (come previsto dall'appena citato D.M.), ma la produzione di energia proseguirà anche dopo tale periodo considerando che in questo lasso di tempo l'impianto fotovoltaico potrebbe ridurre la sua efficienza a non meno del 80%. Il B.E.P. (break event point) o punto di ritorno potrebbe essere fissato a circa metà della durata del contratto, indicativamente intorno all'undicesimo anno.

## **2. QUADRO PROGETTUALE**

### **2.1 SOLUZIONI ALTERNATIVE**

La scelta di investire sul fotovoltaico è stata dettata dal fatto che è l'unica energia rinnovabile utilizzabile nella zona che garantisca un ritorno economico e che non produca un effetto negativo sul territorio e sull'ambiente. L'assenza di vento ed il notevole impatto che l'energia eolica produce sul territorio, l'assenza di materia prima che costituisca una valida alternativa alla produzione di energia elettrica con metodi tradizionali (corsi d'acqua e produzione di energia elettrica attraverso turbine), ha fatto sì che l'unica alternativa possibile per la produzione di energia elettrica, a bassissimo impatto ambientale, ricadesse sul fotovoltaico.

I vantaggi dei sistemi fotovoltaici sono la modularità, le esigenze di manutenzione ridotte (dovute all'assenza di parti in movimento), la semplicità d'utilizzo, e, soprattutto, un impatto ambientale estremamente basso.

In particolare, durante la fase di esercizio, l'unico vero impatto ambientale è rappresentato dall'occupazione di superficie. Tali caratteristiche rendono la tecnologia fotovoltaica particolarmente adatta all'integrazione negli edifici in ambiente urbano. In questo caso, infatti, sfruttando superfici già utilizzate, si elimina anche l'unico impatto ambientale in fase di esercizio di questa tecnologia.

I benefici ambientali ottenibili dall'adozione di sistemi FV sono proporzionali alla quantità di energia prodotta, supponendo che questa vada a sostituire dell'energia altrimenti fornita da fonti convenzionali.

Per produrre un chilowattora elettrico vengono bruciati mediamente l'equivalente di 2,54 kWh sotto forma di combustibili fossili e di conseguenza emessi nell'aria circa 0,58 kg di anidride carbonica (fattore di emissione del mix elettrico italiano alla distribuzione). Si può dire quindi che ogni kWh prodotto dal sistema fotovoltaico evita l'emissione di 0,58 kg di anidride carbonica.

## **2.2 CARATTERISTICHE TECNOLOGICHE DELL'IMPIANTO E SOLUZIONI TECNICHE SCELTE**

La tipologia di impianto che si ha intenzione di realizzare è di tipo fisso. Durante la fase di studio si è valutata la possibilità di realizzare un impianto ad "inseguitore solare" ma, considerando la morfologia del terreno e l'estensione dell'impianto, il beneficio di una maggiore produzione di energia elettrica non garantisce il ritorno economico del maggior investimento. Inoltre per realizzare un impianto ad inseguitore solare si dovrebbero realizzare opere invasive sul terreno come fondazioni e plinti per sostenere la struttura mobile.

Si potrebbe, in ultima analisi, valutare la possibilità di una correzione dell'inclinazione dei pannelli fotovoltaici su base stagionale al fine di aumentarne la resa del 5-8% mediante dei leveraggi manuali agenti sul telaio porta pannelli. Tale correzione dell'inclinazione sarà effettuata due volte l'anno e permetterà di orientare il pannello in base all'effettiva altezza del sole sull'orizzonte: maggiore inclinazione in inverno e minore in estate.

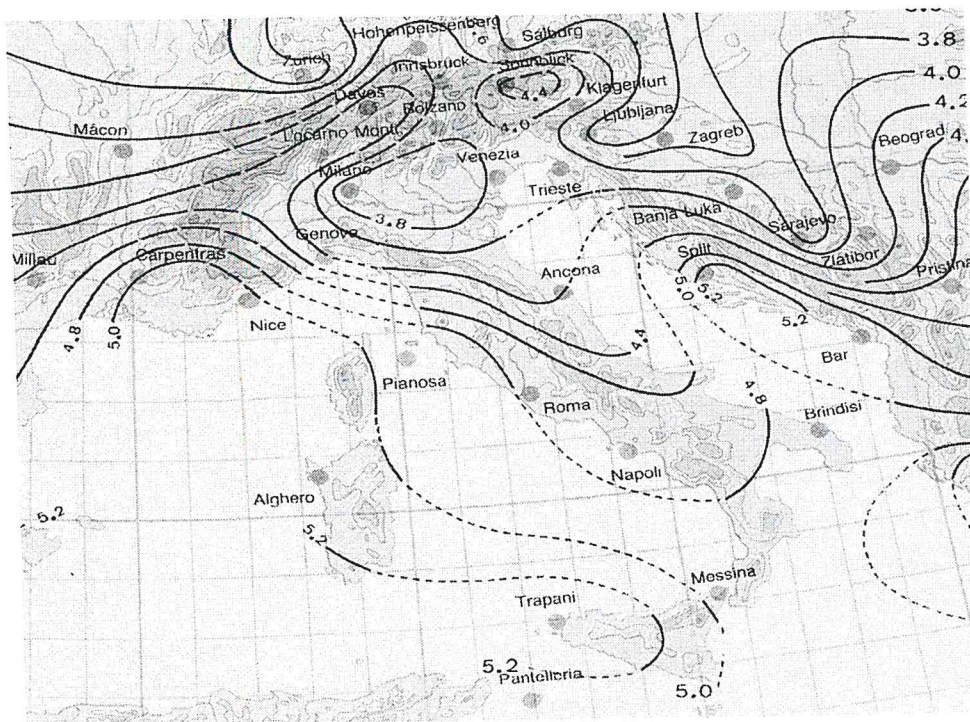
Al fine di evitare un danneggiamento del suolo ed un difficile ripristino a fine vita dell'impianto, si è scelto di non fare fondazioni in cemento armato (come sarà evidenziato dalla relazione tecnica). I pannelli saranno sostenuti da telai conficcati nel terreno che garantiranno un solido sostegno ed un'inclinazione corretta rispetto ai raggi solari.

Ai fini della progettazione di massima e considerando il caso in cui i pannelli siano fissi, sulla base del valore di radiazione solare al suolo sul piano orizzontale nella località di Revigliasco (ASTI), desunto dalle tabelle di irraggiamento su piano inclinato ed orientato dell'ENEA - Radiazione solare globale al suolo media 1994-1997, è stato calcolato con il metodo indicato nella norma UNI 8477/1 il valore della radiazione solare sul piano dei moduli, nella loro inclinazione di progetto.

L'inclinazione prescelta per l'installazione dei moduli è pari a 35° sull'orizzontale.

In base alle curve isoradiative che riportano i valori medi mensili dell'insolazione su superficie orizzontale, si determinano i valori di soleggiamento della località interessata.





### **2.3 LO SMALTIMENTO ED IL RICICLAGGIO DEI COMPONENTI DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO**

In generale, tutte le tecnologie utilizzate nei processi produttivi di moduli fotovoltaici implicano alcune ricadute ambientali che solo adeguati provvedimenti tecnici riescono a mitigare.

La sostenibilità ambientale dell'utilizzo del fotovoltaico deve essere valutata non solo per le indubbie peculiarità non inquinanti (emissioni nocive ed acustiche nulle) ma anche sulla eco-compatibilità dello smaltimento a fine vita utile.

Tale problema si inserisce in uno ben più ampio che riguarda da un lato il riciclo e lo smaltimento di tutti i metalli che fanno parte della tecnologia fotovoltaica e dall'altro in un bilancio ambientale che vede, per esempio, il mercurio delle lampade fluorescenti valutato complessivamente in modo positivo.

Il modulo fotovoltaico è formato da moltissimi elementi di cui solo alcuni si presentano distinti e separabili con facilità (cornice, vetro, tedlar posteriore, polimeri della cassetta di terminazione, metalli delle terminazioni elettriche, ecc.).

TRATTO DALLA TESI DI DOTTORATO DI RICERCA ING. WALTER MORGANO  
UNIVERSITA' "LA SAPIENZA" ROMA DAL TITOLO:

## PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA CON SISTEMI A CELLE FOTOVOLTAICHE ED UTILIZZAZIONE PRESSO LE UTENZE FINALI – POTENZIALE DI SVILUPPO DELLE TECNOLOGIE E CASI STUDIO SIGNIFICATIVI

### Interazione fra la radiazione solare e il pannello fotovoltaico

Come sappiamo il pannello fotovoltaico, ha, sulla sua faccia esposta al Sole, una superficie trasparente, che protegge le celle, comunemente costituita da una lastra di vetro.

Le celle sono montate aderenti alla faccia interna al vetro, con l'interposizione di una resina la quale svolge i seguenti compiti:

- assicurare un buon contatto termico tra cella e vetro;
- realizzare un adattamento ottico fra il vetro e lo strato antiriflesso che si trova sulla superficie della cella stessa.

In tal modo si limita l'aumento di temperatura della cella fotovoltaica rispetto all'ambiente circostante, ed allo stesso tempo si aumenta la quantità di radiazione che penetra nella cella in quanto le riflessioni si riducono, in pratica, solo a quelle che avvengono all'interfaccia aria-vetro sulla superficie del pannello. La figura 86 mostra il modo di suddividersi della radiazione incidente (I) in un pannello.

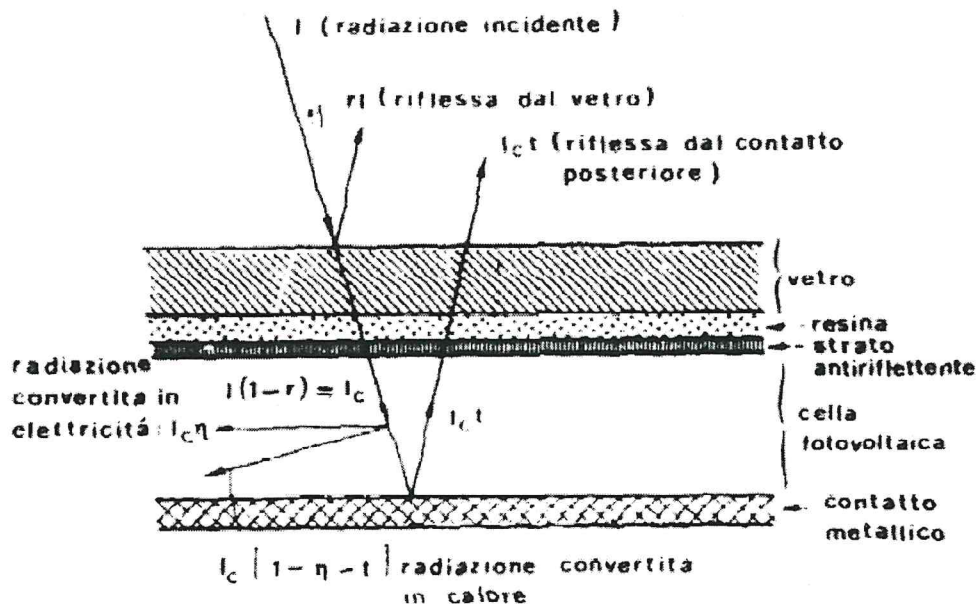


Fig. 86 – Suddivisione della radiazione incidente (I) in un pannello



La radiazione incidente ( $I$ ) viene in parte riflessa secondo il coefficiente di riflessione ( $r$ ), mentre la parte rimanente  $I_E = I(1-r)$ , penetra nel vetro e attraversa gli strati sottostanti di materiale raggiungendo la cella senza subire assorbimenti o riflessioni di rilievo. Se si indica con  $\eta$  il rendimento di conversione della cella fotovoltaica e si ricorda che questa quantità è di solito misurata in assenza di vetro di protezione e per radiazione incidente normale alle celle, per cui sono trascurabili le riflessioni ne segue, che la potenza convertita in elettricità è data da:

$$I_E = \eta I_C$$

per un pannello fotovoltaico.

La frazione di radiazione che non viene convertita in elettricità è a sua volta costituita da due parti. La frazione  $t$  a cui il materiale di cui è composta la cella è trasparente, attraversa la cella senza interazioni di rilievo, raggiunge il contatto posteriore e quindi può essere riemessa dal pannello oppure venire assorbita dal contatto stesso, trasformandosi in calore all'interno di esso.

La frazione di radiazione cui la cella è trasparente è una funzione del semiconduttore usato per costruire la cella.

In particolare il silicio è trasparente alla parte di spettro corrispondente a fotoni la cui lunghezza d'onda sia superiore a  $1,15\mu\text{m}$ .

Questa parte di spettro rappresenta circa  $1/3$  della potenza della radiazione solare AM1.

La parte di radiazione assorbita dalla cella e trasformata in calore è data da:

$$I_t = I_C(1-\eta-t)$$

dove per il silicio  $t=0,33$ , al limite  $t$  sarebbe uguale a 0 se il contatto posteriore fosse costruito con materiale assorbente per la radiazione.

La conoscenza di  $I_t$  ci permette di utilizzare un altro metodo per ritrovare il valore della temperatura a cui si porta la cella ( $T_c$ ).

Data, però, l'incertezza nella determinazione di  $I_t$  essendo essa legata alla tecnologia di fabbricazione della cella, si preferisce basare il calcolo della temperatura delle celle di un pannello esclusivamente su dati sperimentali:

$$T_c = T(\omega) + (NOCT - 20) I_C / 0,8 \quad (8-48)$$

$T(\omega)$  e la temperatura ambiente, essa si esprime come segue:

$$T(\omega) = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) Y1(\omega) + Y2(\omega) \quad (8-49)$$

in cui  $T_{max}$  e  $T_{min}$  sono il valore massimo e minimo delle temperature rilevate sperimentalmente.

$Y1(\omega)$  è l'integrale della potenza incidente su una superficie orizzontale:

$$Y1(\omega) = \sin(\omega + \tau) + \sin \omega_0 - (\omega + \tau + \omega_0) \cos \omega_0 / (\sin \omega_0 - \omega_0 \cos \omega_0) \quad (8-50)$$

Il processo di raffreddamento, che tipicamente evolve con costante di tempo lunga rispetto alla durata del giorno, può essere approssimato da una relazione lineare:

$$Y2(\omega) = Y_0 - A(\omega - \omega_0 + \tau) \quad (8-51)$$

Tramite il confronto con i valori di temperatura rilevati durante il giorno, si sono determinati i seguenti valori:

$$Y_0 = 0.492$$

$$A = 6.88 \times 10^{-2} \text{ rad}^{-1}$$

$$\tau = \omega_0 / 2$$

La NOCT (Normal Operating Cell Temperature) è funzione delle caratteristiche costruttive del pannello e viene misurata a  $T = 20^\circ\text{C}$  con radiazione incidente perpendicolarmente sul pannello di  $0.8 \text{ K W / m}^2$ , velocità del vento di  $1 \text{ m/s}$  con il circuito aperto.



L'uso dei valori di NOCT della tabella fornisce il limite superiore della temperatura della cella e quindi fornisce il limite superiore della temperatura della cella e quindi una stima per difetto della potenza prodotta.

Per venti più forti di 1 m/s, la temperatura delle celle diminuisce a parità di soleggiamento.

### Effetto del vetro

Come abbiamo osservato  $I_E$  e  $T_c$  dipendono da  $I_c$  che a sua volta dipende dal coefficiente di riflessione  $r$ . Quest'ultimo dipende dall'angolo  $\theta$  tra radiazione incidente e normale al pannello e dall'indice di rifrazione  $\nu$  del vetro rispetto all'aria.

$$r(\theta) = 0,5[(\sin(\theta - \theta')/\sin(\theta + \theta'))^2 + (\tan(\theta - \theta')/\tan(\theta + \theta'))^2] \quad (8-52)$$

$$r = \sin \theta / \sin \theta'$$

A causa della dipendenza di  $r$  dall'angolo di incidenza della radiazione, le componenti diretta e diffusa vanno trattate in maniera diversa per ciò che riguarda il vetro.

La componente diretta della densità di potenza che entra nella cella IBC si ricava come segue:

$$I_{BC} = I_B (1-r) \quad (8-53)$$

in cui  $I_B$  è data dalla (8-45).

Il calcolo della radiazione diffusa richiede l'integrazione di  $r(\theta)$  relativa alla volta celeste vista dal pannello: ciò però complicherebbe notevolmente queste valutazioni.

Un modo approssimato, ma pur sempre valido, di determinare la radiazione diffusa che attraversa il vetro, consiste nel sostituire la curva effettiva del coefficiente di trasmissione  $\tau = 1-r$  con un fattore di trasmissione pari al valore di  $\tau$  per  $\theta = 0$ :

$$\tau_0 = \tau(\theta = 0) = 1 - (\nu^{-1}/\nu + 1) \quad (8-54)$$

fino all'angolo  $\theta_{\text{lim}}$  scelto in maniera tale da conservare il valore dell'integrale di  $\tau$  in  $\theta$ .

Si assume in pratica che il pannello non veda la parte di cielo che si trova ad un angolo maggiore di  $\theta_{\text{lim}}$  rispetto alla normale al pannello, mentre la parte diffusa che viene raccolta dalla cella,  $I_{DC}$ , sia attenuata secondo  $\tau_0$ . Così per un pannello inclinato di un angolo  $S$  rispetto all'orizzontale detto  $\phi$

$\lim = \pi/2 - \theta_{\text{lim}}$  ed  $S'$  il più grande tra gli angoli  $S$

e  $\phi_{\text{lim}}$  risulta:

$$I_{DC} = I_{D0} \tau_0 (1 + \cos(S' + \phi_{\text{lim}}))/2 \quad (8-55)$$

con  $\nu$  compreso tra 1,5 e 1,8 che sono valori tipici del vetro usati nelle celle fotovoltaiche le cui caratteristiche sono già state esaminate.

La (8-55) fornisce un valore di  $I_{DC}$  approssimato del 15% qualunque sia l'inclinazione dei pannelli.

In figura 87 è raffigurata la curva (8-52) ed in figura 88 la relazione tra  $\theta_{\text{lim}}$  e  $\tau_0$  con l'indice di rifrazione  $\nu$ : i dati sono sperimentali.

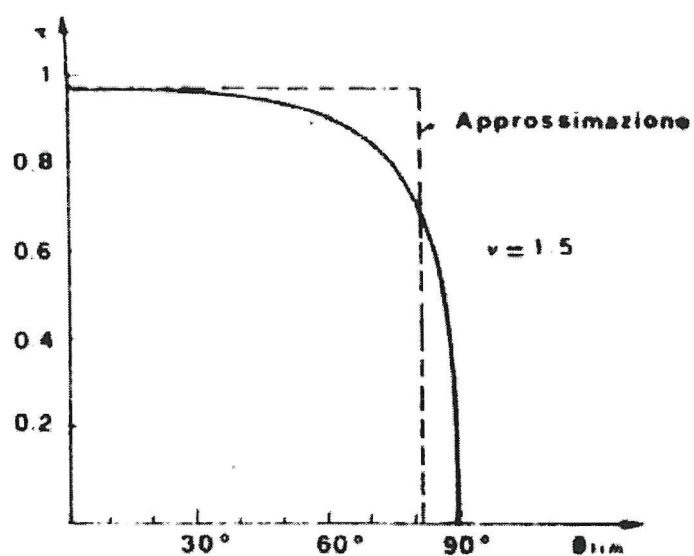


Fig. 87 – Diagramma relativo all'influenza del vetro

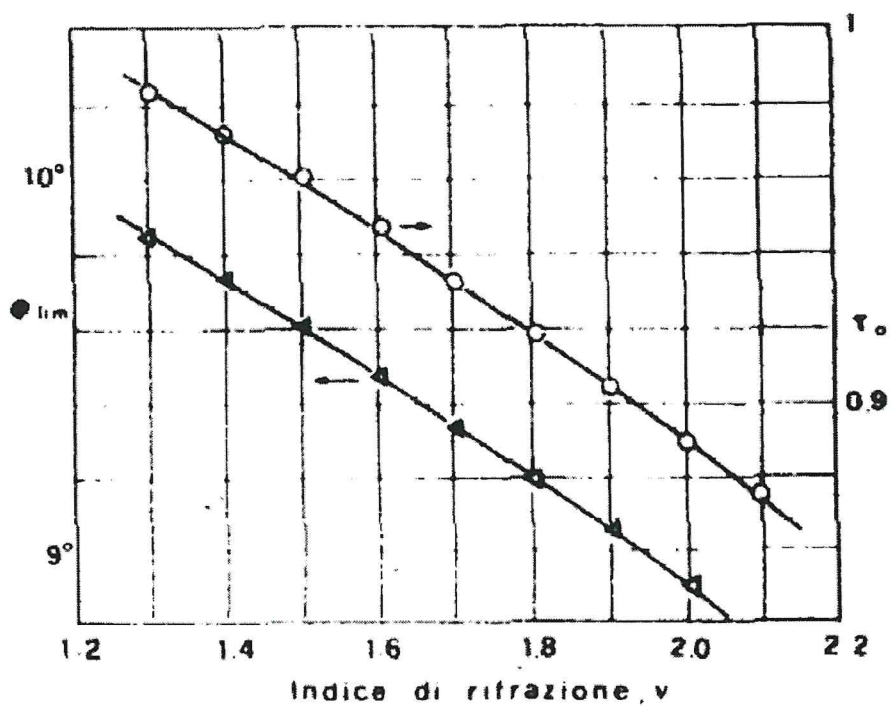


Fig. 88 – Diagrammi relativi all'influenza del vetro

Per quanto riguarda la radiazione di albedo si può dire che può venire trattata in maniera analoga alla radiazione diffusa modificando l'angolo entro cui questa componente della radiazione vede le celle fotovoltaiche.

La radiazione totale raccolta dalle celle Ic, è data dalla somma delle tre componenti diretta, diffusa e albedo, ciascuna elaborata per tenere conto dell'effetto del vetro, come è stato mostrato in questo paragrafo.

Il tecnico  
Ing. Agide Maria Borelli

