

# Photovoltaic Creativity

Cod. 81851 Introduzione alla Fisica dei sistemi complessi

Relazione sul progetto sviluppato

Duccio Marco Gasparri, matricola 852926, [ducciomarco.gasparr2@studio.unibo.it](mailto:ducciomarco.gasparr2@studio.unibo.it)

Matteo Pirazzini, matricola 833550, [matteo.pirazzini3@studio.unibo.it](mailto:matteo.pirazzini3@studio.unibo.it)

Andrea Tallaros, matricola 935420, [andreaelia.tallaros@studio.unibo.it](mailto:andreaelia.tallaros@studio.unibo.it)

Alessandro Freda, matricola 931303, [alessandro.freda2@studio.unibo.it](mailto:alessandro.freda2@studio.unibo.it)

## 1. Introduzione

L'inquinamento globale e in particolare l'aumento delle temperature sono una delle tematiche più calde e sentite degli ultimi anni in quanto colpisce direttamente il nostro pianeta e noi stessi. Proprio per questo motivo sempre più Paesi nel mondo stanno puntando molto sulle energie rinnovabili al fine di diminuire le emissioni inquinanti e di ridurre la quota prodotta da fonti fossili.

Il progetto presentato sviluppa il tema del fotovoltaico, una tecnologia molto diffusa e sufficientemente economica da risultare ormai competitiva con altre fonti tradizionali.

Il progresso nelle tecnologie dei moduli fotovoltaici ha permesso la creazione di pannelli con geometrie non planari, anche al fine di seguire le geometrie esistenti ed essere maggiormente integrate all'interno delle architetture degli edifici stessi.

Lo scopo di questo progetto è di sviluppare un modello teorico e un'applicazione software per permettere di simulare come la diversa geometria del pannello influisca sulla produzione dell'installazione fotovoltaica.

Dapprima si affronterà il modello sole-terra, incluso gli angoli di irraggiamento e la massa d'aria che la radiazione solare attraversa prima di raggiungere il suolo. Successivamente si affronterà la radiazione rifratta e l'effetto che l'angolo relativo tra la radiazione diretta e la normale di ciascuna componente del pannello solare ha sull'assorbimento e relativa produzione. Si procederà poi ad alcune verifiche del modello esposto, sia di verosimiglianza, sia di raffronto con i dati di irraggiamento presenti nelle banche dati, sia di raccolta diretta di dati attraverso un pannello solare. A tal proposito si è predisposto un apparato composto da pannello solare, carico

resistivo e strumenti di misura per permettere di raccogliere dati empirici, che sono esposti e discussi.

Successivamente si affronta l'implementazione software del modello. Si espongono altresì i risultati che sono stati ottenuti attraverso simulazioni su geometrie di pannelli solari usati come modelli esemplificativi.

## 2. Posizione del Sole

Per ogni giorno  $N$  dell'anno viene calcolata la declinazione rispetto al Sole dell'asse di rotazione terrestre  $\delta$  [Eq 1, gradi]:

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right]$$

L'angolo tra il Sole e l'osservatore per ogni minuto ( $min$ ) della giornata  $h$  è calcolato rispetto *mezzogiorno solare* (che si fissa alle 12:00 ora locale dell'osservatore) [Eq 2, gradi; i valori negativi rappresentano gli antimeridiani]:

$$h = \pm 0.25(min)$$

Vengono così definiti gli angoli limiti  $h_{ss}$  corrispondenti all'alba e al tramonto, i quali dipendono dal giorno  $N$  e dalla latitudine  $L$  dell'installazione (positiva per i valori a nord dell'equatore e negativa per i valori a sud dell'equatore). Per  $h$  al di fuori dell'intervallo  $(-h_{ss}, h_{ss})$  l'insolazione è zero per costruzione.

Si ricavano poi gli angoli di Zenith solare  $\Phi$  e il complementare angolo di altitudine solare  $\alpha$  [Eq 3, gradi]:

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)$$

L'angolo di Azimut  $z$  dipendente dall'altitudine solare  $\alpha$  [Eq 4, gradi]:

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta)\sin(h)}{\cos(\alpha)}$$

Viene definita *massa d'aria* con indice  $m$  la lunghezza percorsa dalla radiazione solare attraverso l'atmosfera. Tale indice è normalizzato rispetto alla perpendicolare sul piano orizzontale dell'installazione (che si considera il percorso più breve, con  $m$  uguale a 1) [Eq 5]:

$$m = \frac{1}{\cos(\Phi)}$$

Data la costante solare  $G_{sc}$  (pari a  $1366.1 \text{ W/m}^2$ ) si calcola la radiazione che raggiunge una superficie orizzontale extra-atmosfera (radiazione extraterrestre misurata sul piano normale alla radiazione dell'ennesimo giorno dell'anno)  $G_{on}$  [Eq 6,  $\text{W/m}^2$ ]:

$$G_{on} = G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right]$$

Si ricava poi la radiazione incidente su una superficie orizzontale extraterrestre ad un certo tempo dell'anno  $G_{oH}$  (dipendente dall'angolo di Zenith  $\Phi$ ) [Eq 7,  $\text{W/m}^2$ ]:

$$G_{oH} = G_{on} \cos(\Phi)$$

La radiazione totale giornaliera incidente su una superficie orizzontale extraterrestre  $H_o^{rad}$  si ricava integrando  $G_{oH}$  lungo il corso della rotazione terrestre di  $360^\circ$  tramite l'angolo  $h$ , che è funzione dei minuti della giornata e rappresenta la variabile temporale. Si ricorda però che l'alba e il tramonto sono stati posti come limiti dell'intervallo oltre al quale non vi è più irraggiamento. Pertanto, l'integrazione si limita all'intervallo  $[-h_{ss}, h_{ss}]$  essendo, fuori da tale intervallo,  $G_{oH}$  zero per costruzione [Eq 8, si tiene conto della simmetria rispetto all'asse,  $\text{J/m}^2 2\pi$ ]:

$$H_o^{rad} = \int_{-h_{ss}}^{h_{ss}} G_{oH} dh = 2 \int_0^{h_{ss}} G_{oH} dh$$

$$H_o^{rad} = 2G_{on} \left[ \cos(L)\cos(\delta) \int_0^{h_{ss}} \cos(h) dh + \sin(L)\sin(\delta) \int_0^{h_{ss-rad}} dh \right]$$

$$H_o^{rad} = 2G_{on} [\cos(L)\cos(\delta)\sin(h_{ss}) + h_{ss-rad}\sin(L)\sin(\delta)]$$

La costante temporale è espressa in radianti. Convertendola in secondi si ottiene la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata  $H_o$  [Eq 9,  $\text{J/m}^2 \text{giorno}$ ]<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> Per la conversione in radianti bisogna tenerne conto in  $h_{ss} \pi/180$ , e non riconvertirlo se si hanno già i radianti per

$$H_o^{rad} = 2G_{on} [\cos(L)\cos(\delta)\sin(h_{ss}) + h_{ss-rad}\sin(L)\sin(\delta)]$$

dove  $h_{ss}$  è l'angolo orario corrispondente al tramonto.

$$H_o = \frac{24 * 60 * 60}{2\pi} H_o^{rad}$$

La percentuale media di radiazione assorbita dall'atmosfera è stata approssimata confrontando i dati di insolazione rilevati al suolo rispetto ai dati extra-atmosfera. In particolare, sono stati estratti dalla collezione NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER), database *Climatology Resource for Agroclimatology*, le serie *Top-of-atmosphere insolation* (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m<sup>2</sup>/day) e la *All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface* (codice ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m<sup>2</sup>/day) su un periodo che va dal giorno 1 al giorno 365 dell'anno 2015, per un totale di 365 record.

Operando in ipotesi di clear sky, sono stati selezionati i massimi relativi per eliminare abbassamenti dovuti alla presenza di nuvole o foschia, e di questi è stata fatta una media mensile. Essendo dati giornalieri, tale ipotesi presuppone che, in ciascun mese, vi sia stato almeno un giorno di pieno Sole. Tale fattore viene espresso in percentuale di  $H_o$  e indicato con il termine  $r_{groud}$ .

Mese	$r_{groud}$
Gennaio	61%
Febbraio	64%
Marzo	67%
Aprile	67%
Maggio	67%
Giugno	67%
Luglio	67%
Agosto	67%
Settembre	64%
Ottobre	61%
Novembre	55%
Dicembre	55%

Tabella 1 - Fattore correttivo per l'assorbimento dell'atmosfera in ipotesi di clear sky

Il complementare di tale percentuale include sia la radiazione assorbita dall'atmosfera e trasformata in calore, sia la radiazione riflessa non in direzione della superficie. Ne consegue che la radiazione totale giornaliera su un piano parallelo al terreno  $H$  è [Eq 10,  $J/m^2 \text{giorno}$ ]:

$$H = r_{groud} H_o$$

Si approssima la quota di radiazione totale oraria rispetto alla radiazione totale giornaliera  $H$  secondo la seguente formula [Eq 11]:

$$r = \frac{\pi}{24} [\alpha + \beta \cos(h)] \frac{\cos(h) - \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - h_{ss}^{rad} \cos(h_{ss})}$$

Con  $\alpha$  e  $\beta$  così calcolate [Eqq 12 e 13]:

$$\alpha = 0.409 + 0.5016 \sin(h_{ss} - 60)$$

$$\beta = 0.6609 - 0.4767 \sin(h_{ss} - 60)$$

Si definisce la quota di radiazione totale  $G$  su una superficie orizzontale [Eq 14,  $J/m^2 \text{ora}$ ]:

$$G = rH$$

Si calcola ora la quota di radiazione diretta  $G_B$  che raggiunge la superficie, e la quota di radiazione diffusa/diffratta  $G_D$  che raggiunge la superficie. Si approssima l'effetto della diffrazione atmosferica attraverso una relazione lineare tra i due estremi, ossia tra il minimo di massa d'aria, ove la diretta rappresenta l'85% del totale, e il massimo di massa d'aria all'approssimarsi dell'alba e del tramonto, in cui la diretta rappresenta il 60% [Eqq 15 e 16,  $J/m^2 \text{ora}$ ,  $h_{ss}$  e  $h$  in radianti]

$$G_{B,Joule} = 0.6G + 0.25(h_{ss} - |h|) \frac{2}{\pi} G$$

$$G_{D,Joule} = 0.4G - 0.25(h_{ss} - |h|) \frac{2}{\pi} G$$

Che possono essere agevolmente convertita in  $Wh$  seguendo la formula [Eqq 17 e 18,  $Wh/m^2$ ]:

$$G_B = \frac{G_{B,Joule}}{3600}$$

$$G_D = \frac{G_{D,Joule}}{3600}$$

Per costruzione, quindi, la radiazione totale  $G$  su una superficie orizzontale è la somma della radiazione diretta  $G_B$  e della radiazione assorbita dalla massa d'aria e diffusa  $G_D$ <sup>2</sup> [Eq 19,  $Wh/m^2$ ]

$$G = G_B + G_D$$

### 3. Irraggiamento del pannello

Per ogni micro-pannello che compone il pannello, viene calcolato l'angolo  $\beta$  di inclinazione del pannello in gradi rispetto al terreno, e l'angolo  $Z_S$  di inclinazione del pannello fra il sud e la perpendicolare del pannello (zero se simmetrico rispetto all'asse Y, positivo verso ovest).

L'inclinazione del micro-pannello nello spazio 3D forma un angolo proprio con la specifica posizione del Sole al tempo  $t$ , chiamato angolo di incidenza  $\theta$ , che si ottiene attraverso la seguente formula [Eq 20, gradi]:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L)\sin(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\sin(\delta)\sin(\beta)\cos(Z_S) \\ & + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(\beta) + \sin(L)\cos(\delta)\cos(h)\sin(\beta)\cos(Z_S) \\ & + \cos(\delta)\sin(h)\sin(\beta)\sin(Z_S) \end{aligned}$$

L'attraversamento dell'atmosfera dai raggi solari produce non solo un effetto di assorbimento e rifrazione, ma anche una modifica dello spettro della radiazione solare. L'impatto finale di questo shift dipende dalle caratteristiche costruttive del pannello. Un coefficiente modificativo è stato ottenuto sperimentalmente e descritto tramite una regressione a coefficienti  $\alpha_i$  ottenuti da prove di laboratorio. [Eq 21] :

---

<sup>2</sup> Si decide di ignorare la radiazione riflessa dal terreno, essendo la stessa una componente potenzialmente minore e dipendente dal materiale della superficie sulla quale poggia l'installazione (acqua, terreno, vegetazione, neve, sabbia...)

$$M = \alpha_0 + \alpha_1 m + \alpha_2 m^2 + \alpha_3 m^3 + \alpha_4 m^4$$

<b>Table 9.4</b> Values of $\alpha_i$ Constants for Various PV Panels Tested at NIST				
<b>Cell Type</b>	<b>Silicon Thin Film</b>	<b>Monocrystalline</b>	<b>Polycrystalline</b>	<b>Three-Junction Amorphous</b>
$\alpha_0$	0.938110	0.935823	0.918093	1.10044085
$\alpha_1$	0.062191	0.054289	0.086257	-0.06142323
$\alpha_2$	-0.015021	-0.008677	-0.024459	-0.00442732
$\alpha_3$	0.001217	0.000527	0.002816	0.000631504
$\alpha_4$	-0.000034	-0.000011	-0.000126	$-1.9184 \times 10^{-5}$

Tabella 2 - Costanti della regressione del coefficiente modificativo  $M$  dovuto all'effetto dell'atmosfera terrestre sullo spettro della radiazione solare. Ciascun materiale reagisce diversamente a tale cambiamento di spettro. Riprodotta da: Kalogirou 2014, *Solar Energy Engineering*. I test sono stati effettuati dal National Institute of Standards and Technology (NIST) (Fannee et al., 2002)

La presente simulazione utilizza i coefficienti per i pannelli policristallini. Tuttavia, come evidenziato da De Soto (2006), per un angolo di Zenith compreso tra  $0$  e  $\pm 70^\circ$  (i più rilevanti) l'impatto è minimo, essendo la  $M$  ricompresa tra  $0.982$  e  $1.026$  (si ricorda che il coefficiente  $M$  esprime solo l'effetto del cambiamento dello spettro della luce, a parità di irradiazione ed angolo). Oltre i  $70^\circ$  la regressione fornisce risultati inconsistenti e all'approssimarsi dei  $90^\circ$  tende a  $-\infty$ . Pertanto per angoli superiori a  $70^\circ$  il coefficiente  $M$  verrà impostato al valore di  $1.02624$ .

La rifrazione della superficie del pannello crea un angolo di rifrazione  $\theta_r$  dato dal coefficiente di rifrazione  $n$  del materiale che compone la superficie, che si suppone essere vetro con relativo indice pari a  $1.526$  [Eq 21]:

$$\sin(\theta_r) = \frac{\sin(\theta)}{1.526}$$

Il modificatore correttivo per l'indice di rifrazione  $(\tau\alpha)_n$  che include la trasmittanza  $\tau$  [Eq 22] e dipende dallo spessore del pannello  $L_T$  e dal coefficiente di estinzione del sistema fotovoltaico  $K$  secondo la seguente formula [Eq 23]:

$$\tau = e^{-[KL_T/\cos(\theta_r)]}$$

$$(\tau\alpha)_n = e^{-KL_T} \left[ 1 - \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]$$

Il modificatore correttivo di incidenza angolare  $(\tau\alpha)_\theta$  in ipotesi che il raggio non sia perpendicolare al pannello viene calcolato tramite la media della componente perpendicolare e parallela del raggio [Eq 24]:

$$(\tau\alpha)_\theta = e^{-[KL_T/\cos(\theta_r)]} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right] \right\}$$

La funzione  $(\tau\alpha)_\theta$  è valida su un dominio limitato all'intervallo in radianti  $(-\pi/2; \pi/2)$ : con un angolo tra il pannello e la radiazione maggiore di  $90^\circ$  non ha alcun senso parlare di radiazione diretta, e  $(\tau\alpha)_\theta$  dovrà pertanto essere zero. La funzione presenta altresì un punto di discontinuità per  $\theta$  uguale a zero, ma il limite sia destro che sinistro tende a  $e^{-KL_T}$ .

Le componenti rifratte (D) e riflesse (G) della luce che raggiunge il pannello, sono state empiricamente ricavate per i collettori solari tramite un angolo di incidenza virtuale  $\theta$  per ciascuna delle due componenti, secondo le seguenti relazioni [Eqq 25 e 26]:

$$\theta_{e,D} = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2$$

$$\theta_{e,G} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2$$

Ancorché basate su regressioni, sostituire tali angoli modificati all'interno delle relative equazioni permette di ottenere una buona approssimazione della quota di radiazione incidente. Per tale motivo, d'ora in avanti  $\theta$  e  $(\tau\alpha)_\theta$  verranno rinominati rispettivamente  $\theta_{e,B}$  e  $(\tau\alpha)_B$ .

Da cui si ricava il modificatore dell'angolo di incidenza  $K_{\theta,B}$  [Eq 27]:

$$K_{\theta,B} = \frac{(\tau\alpha)_B}{(\tau\alpha)_n}$$

La stessa sequenza di equazioni, ovvero *Eq 24 ed Eq 27*, si può applicare ai  $\theta_{e,D}$  e  $\theta_{e,G}$  ricavando [Eqq 28 e 29]:

$$(\tau\alpha)_D = e^{-[KL_T/\cos(\theta_r)]} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_r - \theta_{e,D})}{\sin^2(\theta_r + \theta_{e,D})} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta_{e,D})}{\tan^2(\theta_r + \theta_{e,D})} \right] \right\}$$

$$(\tau\alpha)_G = e^{-[KL_T/\cos(\theta_r)]} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_r - \theta_{e,G})}{\sin^2(\theta_r + \theta_{e,G})} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta_{e,G})}{\tan^2(\theta_r + \theta_{e,G})} \right] \right\}$$

Con i relativi [Eqq 30 e 31]:

$$K_{\theta,D} = \frac{(\tau\alpha)_D}{(\tau\alpha)_n}$$

$$K_{\theta,G} = \frac{(\tau\alpha)_G}{(\tau\alpha)_n}$$



La radiazione solare diretta sul pannello  $G_{Bn}$  ci permette di calcolare la radiazione solare su una superficie orizzontale  $G_B$  [W/m<sup>2</sup>], dipendente dall'angolo di Zenith, e la radiazione solare su una superficie inclinata  $G_{Bt}$  [W/m<sup>2</sup>], dipendente dall'angolo di incidenza  $\theta_{e,B}$  [Eq 32 e 33]:

$$G_B = G_{Bn} \cos(\Phi)$$

$$G_{Bt} = G_{Bn} \cos(\theta_{e,B})$$

Il rapporto di tali radiazioni equivale a quello tra i coseni degli angoli di incidenza e di Zenith e permette di calcolare il fattore correttivo di inclinazione della radiazione del fascio  $R_B$  [Eq 34]:

$$R_B = \frac{G_{Bt}}{G_B} = \frac{\cos(\theta_{e,B})}{\cos(\Phi)}$$

La composizione dei fattori correttivi sopra calcolati permette di comporre la radiazione solare assorbita dal pannello ad una determinata ora del giorno  $h$ , in un determinato giorno dell'anno  $N$  che denotiamo con  $S$  [Eq 35]<sup>3</sup>:

$$S = (\tau\alpha)_n M \left\{ G_B R_B K_{\theta,B} + G_D K_{\theta,D} \left[ \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \right\}$$

#### 4. Verifica del modello teorico

Al fine di testare i limiti e gli errori del modello elaborato, si procede ad una serie di verifiche delle varie componenti. Si effettuerà dapprima una verifica del modello Terra-Sole raffrontando i dati di irraggiamento calcolati con i dati rilevati da osservatori e contenuti in banche dati. Successivamente si costruiscono curve di irraggiamento rispetto ai parametri maggiori (angolo e pendenza del pannello solare) per effettuare un controllo di verosimiglianza e ragionevolezza dei dati ottenuti. Infine, si effettuano rilevazioni di rendimento con un pannello solare di area 0,058 m<sup>2</sup> e si confrontano i differenti risultati ottenuti a diverse inclinazioni-angolazioni rispetto ai dati della simulazione.

---

<sup>3</sup> Come già sottolineato nella nota 3 si decide di ignorare la radiazione riflessa dal terreno, essendo la stessa una componente potenzialmente minore, in quanto poco rilevante nei valori, e dipendente dal materiale della superficie sulla quale poggia l'installazione. Per completezza delle formule abbiamo comunque voluto inserire  $(\tau\alpha)_G$  e  $K_{\theta,G}$ .

## Raffronto tra dati calcolati e dati provenienti da banche dati di irraggiamento solare

Si procede ad un primo confronto tra la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata  $H_o$  calcolata secondo il modello suesposto, e i valori rilevati empiricamente. Si definisce l'Università di Bologna come luogo di installazione (Latitudine 44.5075, Longitudine 11.3514).

I dati empirici sono estratti dalla collezione NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER), database *Climatology Resource for Agroclimatology*, serie *Top-of-atmosphere insolation* (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Top-of-atmosphere Insolation, MJ/m<sup>2</sup>/day). Il campione estratto va dal giorno 1 al giorno 365 dell'anno 2015, per un totale di 365 record.

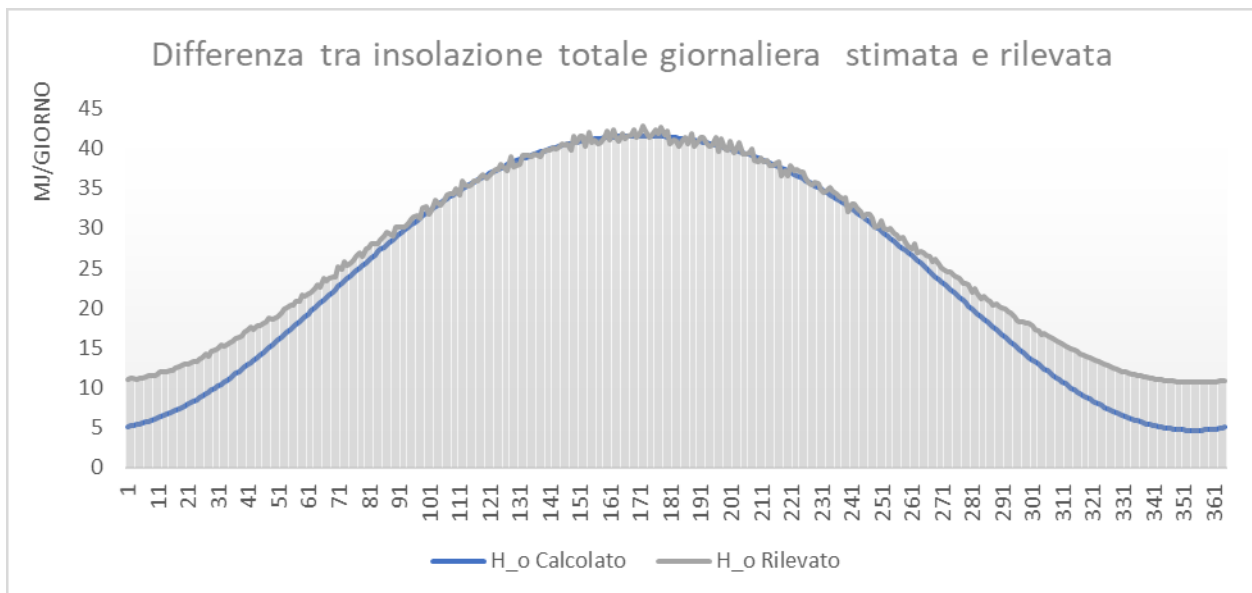


Figura 1 – Raffronto tra la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata calcolata secondo il modello qui presentato, e la stessa quantità rilevata nel corso dell'anno. I dati empirici sono estratti dalla collezione NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER), database *Climatology Resource for Agroclimatology*, serie *Top-of-atmosphere insolation* (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Top-of-atmosphere). Tutti i valori sono espresso in MJ/m<sup>2</sup>/giorno. Il campione estratto va dal giorno 1 al giorno 365 dell'anno 2015, per un totale di 365 record.

Si evince chiaramente come il modello fornisca un'eccellente corrispondenza durante i mesi estivi, ma sottostima fortemente l'irraggiamento durante i mesi invernali. Si nota come la deviazione sia sistematica tra ottobre e febbraio, con un picco a dicembre.

Pur avendo compiuto ricerche nelle banche dati, non è stato possibile trovare letteratura significativa che analizzasse tale deviazione. Un'ipotesi potrebbe essere che, dato la minor

incidenza dei mesi invernali rispetto ai mesi estivi, i modelli vengano calibrati sui mesi più rilevanti accettando implicitamente una deviazione nel restante periodo dell'anno.

### Curve dei parametri più significativi

Si procede ora a costruire le curve dei parametri più significativi ottenuti

Si raffronta la sensibilità dell'assorbimento  $S$  del pannello rispetto alle variazioni del parametro  $\beta$  in due date dell'anno, il 30 gennaio e il 30 luglio.

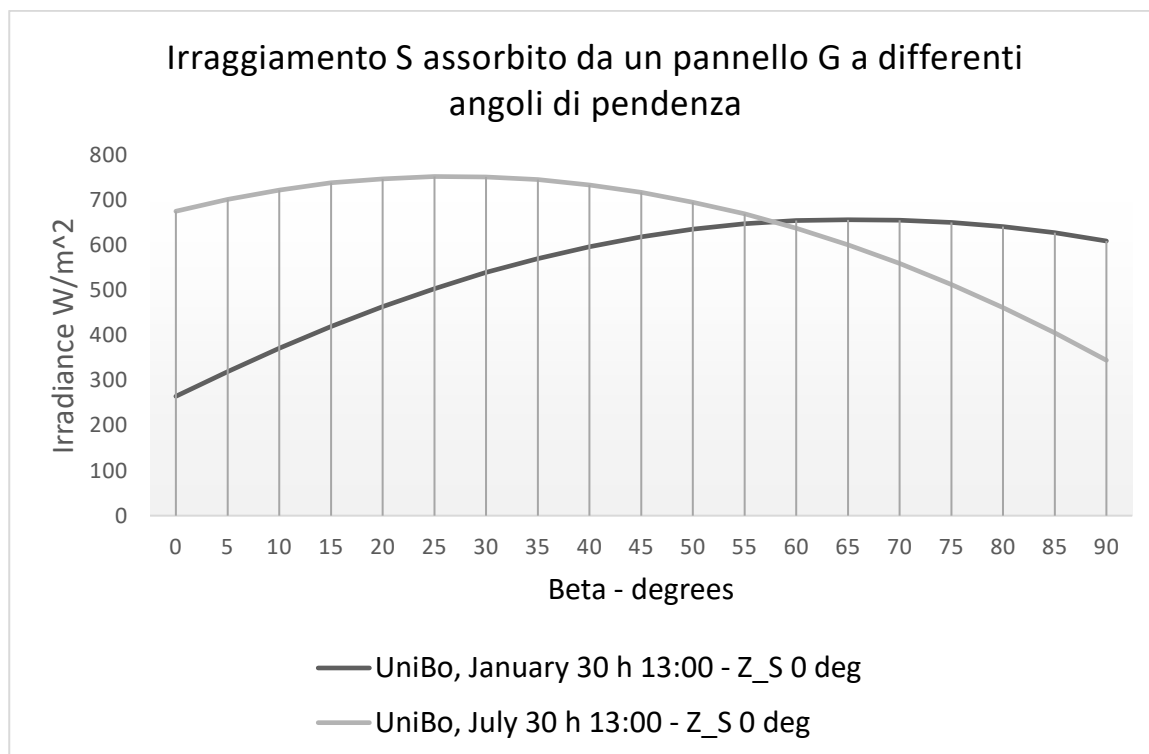


Figura 2 - Simulazione dell'irraggiamento assorbito in un medesimo istante nel tempo (gennaio e giugno) ma a differenti angolazioni di pendenza dell'installazione

Ricordiamo che un  $\beta$  pari a zero corrisponde ad un pannello posto in orizzontale parallelo alla superficie terrestre (ignorando eventuali pendenze del terreno, che si considera in perfetta pianura), mentre un  $\beta$  pari a  $90^\circ$  corrisponde ad un pannello posto ad angolo retto rispetto al terreno.

I dati sono verosimili a quanto ci si aspetterebbe nella realtà. L'irraggiamento tra i 200 e i 750  $W/m^2$  è coerente con quanto viene comunemente ritenuta la radiazione solare al terreno. Inoltre, d'inverno il Sole è più basso e quindi viene richiesto un maggior angolo del pannello per avvicinarsi quanto più possibile alla perpendicolarità tra la superficie del pannello e la radiazione solare diretta. Difatti il picco si raggiunge con un angolo  $\beta$  di  $65^\circ$ - $70^\circ$ . All'opposto d'estate il

Sole ha un'elevazione maggiore e il rendimento migliore si ottiene con un pannello meno inclinato, con un massimo raggiunto a  $27^\circ$ .

La sensibilità dell'assorbimento  $S$  rispetto alla variazione dell'angolo est-ovest  $Z_S$  è riportata in Figura 3.

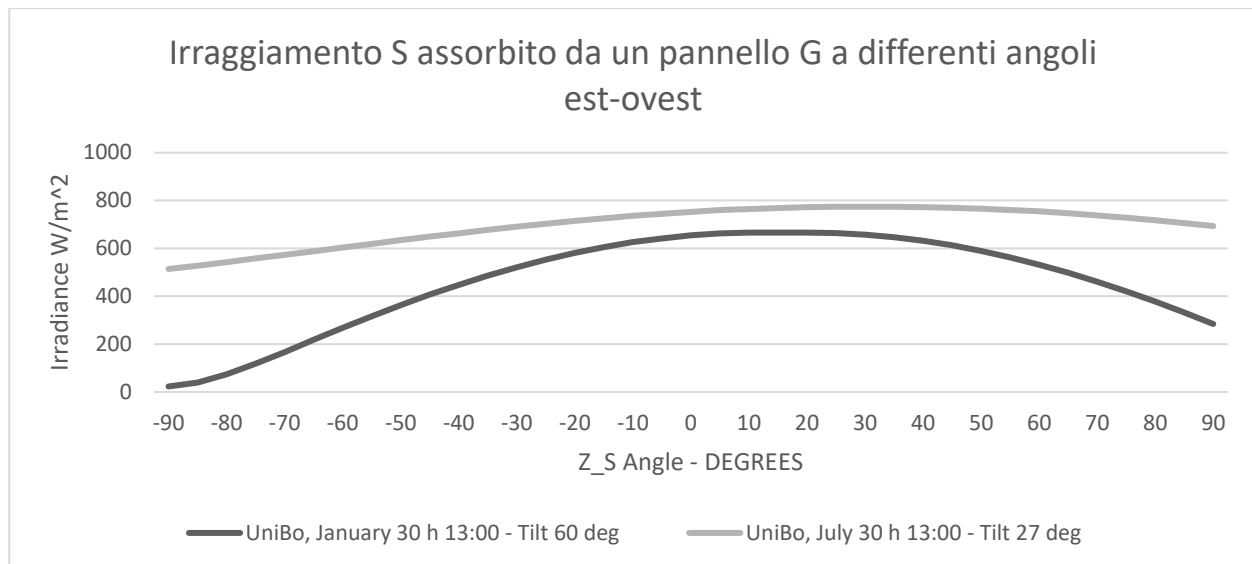


Figura 3 - Simulazione dell'irraggiamento assorbito in un medesimo istante nel tempo (gennaio e giugno) ma a differenti angolazioni est-ovest dell'installazione

Gli angoli  $\beta$  di  $60^\circ$  e di  $27^\circ$  rispettivamente per il mese di gennaio e di luglio sono stati scelti in quanto angoli che massimizzano il picco di assorbimento nei rispettivi mesi.

Un angolo  $Z_S$  di  $90^\circ$  corrisponde ad un pannello con la superficie assorbente orientata verso Est, un angolo di  $0^\circ$  corrisponde ad un pannello orientato verso sud, e un angolo di  $-90^\circ$  corrisponde ad una superficie orientata verso ovest. Essendo dati elaborati alle ore 13:00 locali, il Sole aveva già superato l'asse del sud geografico, e coerentemente il picco massimo si trova a circa  $15^\circ$ .

Anche in questo caso, i dati ottenuti sono verosimili con quanto può essere rilevato empiricamente. Più l'angolo  $Z_S$  del pannello si discosta dal  $15^\circ$ , più la superficie assorbente tende ad essere *di profilo* rispetto ai raggi solari diretti. La maggior pendenza del pannello ( $\beta$  di  $60^\circ$ ) durante il mese invernale e il Sole più basso all'orizzonte contribuiscono a diminuire drasticamente la radiazione diretta, e perciò l'assorbimento del pannello è molto più sensibile al fattore  $Z_S$  durante i mesi invernali che durante i mesi estivi. Il limite è ovviamente il pannello parallelo alla superficie ( $\beta$  di  $0^\circ$ ), in cui l'angolo  $Z_S$  non ha alcuna incidenza sul rendimento.

## Rilevazioni empiriche di irraggiamento

Si è infine proceduto a rilevazioni di resa con un pannello fotovoltaico policristallino. Lo scopo dell'esperimento è di rilevare in che misura il cambio di inclinazione (parametro  $\beta$ ) e di orientamento est-ovest (parametro  $Z_S$ ) influisce sulla resa del pannello, e di verificare se il modello teorico proposto è in grado di prevedere adeguatamente la variazione percentuale di resa al variare dei parametri  $\beta$  e  $Z_S$ .

Le specifiche tecniche del pannello apposte sul retro dello stesso riportano in condizioni standard di test 1000W/m<sup>2</sup> AM1.5 25° una resa nominale di 10W, con parametri di *power maximization* di 17.9V e 0.56A. Il pannello ha dimensioni di superficie assorbente di 320 x 180 mm, per un'area di 0,058 m<sup>2</sup>, ed è senza marca.

E' stato collegato al pannello un carico resistivo misurato di  $(32.8 \pm 0.3) \Omega$ , sufficiente vicino all'ottimo dichiarato in etichetta di 31.9  $\Omega$ . Il resistore di potenza, di complessivi  $(30 \pm 1.5) \Omega$  nominali, è stato montato su un dissipatore di alluminio recuperato da un amplificatore in disuso. Non è stato possibile reperire le specifiche tecniche del dissipatore, tuttavia le misure 120 x 70 x 40 mm, il peso di 320 g e il fatto che fosse montato in un amplificatore lineare di potenza da 40 W non dotato di ventilazione forzata, lo rendono compatibile con modelli nel range di 1.0 – 2.0 K/W, ampiamente sufficiente per le necessità dell'esperimento. Il dato è confermato dal fatto che dopo un'ora di uso a circa 6 W, il dissipatore risultava leggermente più caldo al tatto rispetto a quanto percepibile all'inizio delle rilevazioni. Si rileva comunque che essendo gennaio la temperatura ambiente era di 6°, contribuendo alla miglior dissipazione.

Il pannello è stato integrato in una struttura in legno mobile che ne permette di regolare manualmente l'inclinazione rispetto alla superficie (parametro  $\beta$ ) in un range da 0 a 90°, e – ruotando la struttura – la declinazione della normale rispetto al sud geografico (parametro  $Z_S$ ). Il  $\beta$  è stato misurato con un Bosch Professional GLM 50 C (incertezza dichiarata dal produttore  $\pm 0.2^\circ$ ). La declinazione rispetto al sud geografico è stata misurata con la bussola del cellulare, tenendo il cellulare appoggiato sulla base piana frontale della struttura in legno alla quale era appoggiato anche la base del pannello. Non è nota l'incertezza della bussola interna al cellulare, e la lettura riporta la prima cifra decimale. Si presuppone pertanto che sia di  $\pm 0.2'$ . La tensione è stata misurata con un multimetro Lafayette modello DMB-6 usando la scala 40.00 V con una sensibilità di 0.01 V. L'incertezza da manuale è di  $\pm 1,2\%$  della lettura  $\pm 2$  cifre. La corrente è stata misurata con un multimetro Tacklife DM10 usando la scala da 1.000 A, con una sensibilità di 0.001 A. L'incertezza da specifiche tecniche è di 2.5% della lettura  $\pm 5$  cifre.



Figura 4 - Vista frontale del pannello solare

Solar Module	
Spec	10W
Serial NO.	
Date	
Irradiance And Cell Temperature	1000W/m <sup>2</sup> AM1.5 25°
Pmax	10 W
Vpm	17.9V
Ipm	0.56A
Voc	22.41V
Isc	0.61A
CE	

Figura 5 - Etichetta con specifiche tecniche riportate sul retro del pannello

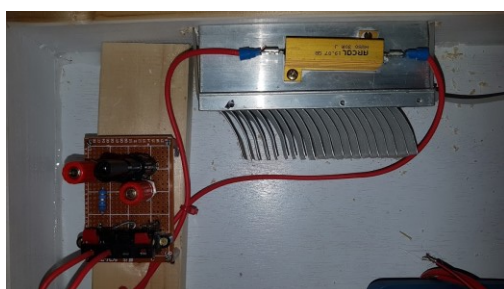


Figura 6 - Circuito di carico resistivo di 32.8 Ohm montato su dissipatore di alluminio

In una giornata di cielo sereno si è proceduto ad installare il pannello e l'elettronica di carico al Parco di Villa Angeletti, Bologna. Il luogo è stato scelto in quanto permetteva di avere un orizzonte libero da costruzioni e vegetazione su tutti i 360°.



Figura 7 - Parco di Villa Angeletti, Bologna, vista a 360° rispetto all'installazione. L'orizzonte è libero da costruzioni e vegetazione.





Figura 8 - Vista del pannello appoggiato sul terreno

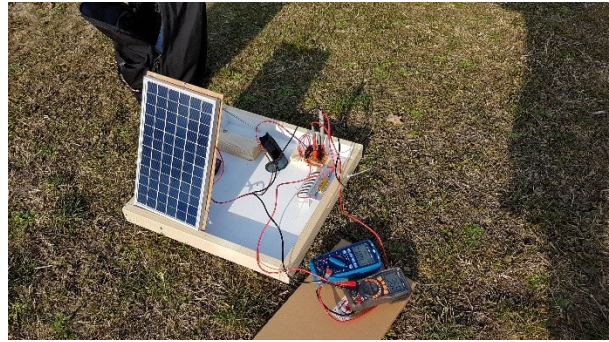


Figura 9 - Sonde e collegamenti ai multimetri e al carico resistivo

Si è quindi proceduto a variare il  $\beta$  e  $Z_S$  del pannello in posizioni prestabilite, e a rilevare la resa effettiva in W.

$\beta$	$Z_S$	V	A	W	S Rilevato (W/m <sup>2</sup> )	S Stimato dalla simulazione (W/m <sup>2</sup> )
18	0	6.22±0.09	0.19±0.01	1.2±0.1	119.4	383.1
30	0	11.41±0.16	0.36±0.01	4.1±0.2	406.2	476.8
47	0	13.72±0.18	0.43±0.02	5.9±0.3	585.8	569.3
47	15	13.24±0.18	0.41±0.02	5.4±0.3	544.2	595.7
62	0	14.48±0.19	0.45±0.02	6.5±0.3	653.0	608.5
88	0	11.80±0.16	0.38±0.01	4.5±0.2	446.0	587.4

Tabella 3 - Bologna, Parco di Villa Angeletti, 17 Gennaio 2020 ore 13:25, rilevazioni di irraggiamento assorbito S a diversi valori di  $\beta$  e  $Z_S$

I dati rilevati confermano sostanzialmente i valori ottenuti dalla simulazione, incluse le variazioni di assorbimento dovute al cambio degli angoli  $\beta$   $Z_S$ , anche se sembrano produrre una forte sovrastima per i valori di  $\beta$  estremi. Tuttavia, questi angoli sono quelli che hanno un minor impatto sul rendimento complessivo.

Viene tuttavia smentita l'ipotesi che la simulazione nel complesso sottostimi l'irraggiamento nei mesi invernali. Probabilmente l'effetto è compensato dai correttivi successivi presenti nel modello.

## 5. Implementazione software

Il software è composto da quattro componenti:

- una libreria che implementa il modello di simulazione dell'irraggiamento solare come descritto in precedenza;
- un applicativo eseguibile con interfaccia grafica per caricare i modelli vettoriali dei pannelli e eseguire le simulazioni (**pvc-creativity**);
- uno script a riga di comando di basso livello per le operazioni di verifica e debugging delle librerie (**pvc-commandline**);
- un insieme di script Java e C++ per la creazione di alcune geometrie comune di pannelli (**geometries**).

Tutto il codice si può trovare su GitHub nel repository <https://github.com/dgasparri/pvc-creativity>

### **Libreria del modello di simulazione**

La libreria scritta in codice C++ ed è suddivisa in cinque files, tutti contenuti all'interno della cartella `./src/lib`:

- File **geometry\_fp.h** contente i metodi matematici per gestire e modellare le figure geometriche dei pannelli;
- File **panel\_io.h** con l'interfaccia per caricare le geometrie dei pannelli contenuti in file *pseudo .stl*;
- File **sun\_fp.h** contente la parte di simulazione relativa ai movimenti Terra-Sole;
- File **irradiance\_fp.h** contente la parte di simulazione afferente all'atmosfera e alla diffrazione dei raggi;
- File **panel\_irradiance.h** contenente la parte di simulazione relativa ai raggi incidenti e alla radiazione solare assorbita dal pannello.

Lo sviluppo della libreria ha seguito quanto illustrato nella presente relazione.

### **Applicativo eseguibile con interfaccia per la simulazione**

L'applicativo è stato redatto in C++ e si basa su un'interfaccia grafica FLTK, sulla libreria di simulazione per la creazione dei dati, e sul programma di elaborazione grafica GnuPlot. È stato compilato con Visual Studio 2019 su piattaforma Windows.

L'applicativo carica i file delle geometrie dei pannelli in un formato *pseudo .stl* e ne fornisce una rappresentazione grafica nel riquadro. Il file con le geometrie è scelto dall'utente tramite una finestra di selezione.



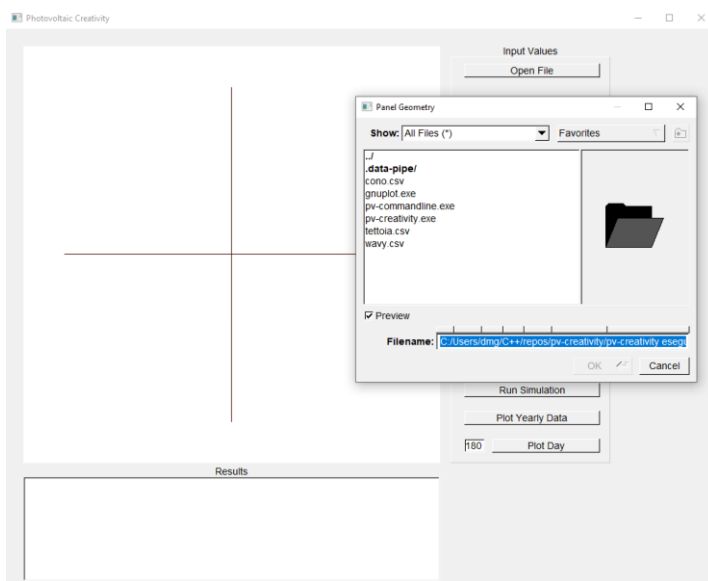


Figura 10 - Assi cartesiani e possibilità di scelta della figura geometrica rappresentante l'installazione fotovoltaica

Il file viene caricato in un vettore di vertici istanziato all'interno del file `fltk_3dpanel.cpp`, e contestualmente si procede all'aggregazione dei vertici per la costruzione della figura e al loro caricamento in OpenGL (file: `fltk_3dpanel_opengl.cpp`). All'utente è data la possibilità di ruotare la vista della forma all'interno della finestra.

Il sistema cartesiano di riferimento utilizza X come asse est-ovest, Y come asse nord-sud, e Z come altezza rispetto al terreno. Sono stati disegnati gli assi X e Z tra -5 e 5, ed è stata posizionata una fonte luminosa bianca alla posizione  $\langle 4, 0, 8 \rangle$  e  $\langle 10, -10, 8 \rangle$  [Khronos, sito web]. La camera è stata posizionata alle coordinate  $\langle 0, -15, 0 \rangle$  e punta verso il vertice degli assi [OpenGL Faq n. 8]. I singoli triangoli che compongono le geometrie vengono dinamicamente colorati con sfumature di azzurro per aumentare la visibilità. Nel sistema di conversione un delta di 1 sulle coordinate cartesiane corrisponde ad un metro.

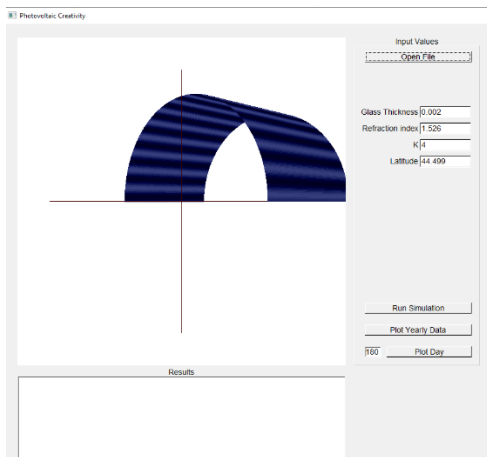


Figura 11 - Caricamento e visualizzazione di una installazione a forma di arco

Viene consentito di impostare alcuni parametri necessari per la simulazione, nella fattispecie  $K$ ,  $L_T$ ,  $n$ , e la latitudine.

Tramite il pulsante “Run Simulation” il software itera in tre loop annidati tra il giorno 1 e il giorno 365 con step giornaliero, tra le ore 9 e le ore 18 con step orario, e tra tutte le figure geometriche in cui è scomposta l’installazione fotovoltaica.

Il software produce i seguenti file:

- **./data-pipe/panel-geometry.csv** contenente i dettagli della rielaborazione della struttura geometrica dell’installazione
- **./data-pipe/simulation-data-day-NNN.txt** con i risultati giornalieri della simulazione, per la creazione dei grafici 2D di ciascuna giornata;
- **./data-pipe/simulation-data-yearly.txt** con i risultati annuali della simulazione, per la creazione del grafico 3D rappresentante l’andamento lungo tutto l’anno;

Attraverso i pulsanti “Plot Yearly Data” e “Plot Day” viene invocato in un thread separato l’applicativo GnuPlot [GnuPlot] con i parametri necessari per la lettura e la visualizzazione dei file suddetti.

### Script a riga di comando di basso livello

È stato sviluppato anche uno script a riga di comando per poter accedere alle funzioni a basso livello della libreria, sia per il debugging e la verifica del corretto funzionamento, sia per poter approfondire aspetti e sfumature della simulazione che nell’applicativo con interfaccia grafica sono stati nascosti alla vista per ragioni di estetica e funzionalità.

Il codice dell'applicativo si trova nella cartella pv-commandline, e per costruzione condivide le stesse librerie del programma con interfaccia grafica.

L'interfaccia interattiva testuale è stata sviluppata tramite le librerie Boost. Lo script tiene a memoria uno *stato* del sistema, così da poter rendere agevole fare prove di simulazione variando solo i parametri di interesse. Tramite il comando `--default` viene caricata una situazione tipo (installazione all'Università di Bologna, giorno 180, ora 13:00). Con il comando `--verbose` viene riprodotto a schermo tutto lo stato interno del sistema durante la simulazione. Con il comando `--help` viene fornito l'elenco dei comandi disponibili.

### **Script di creazione delle geometrie del pannello**

Per l'implementazione delle geometrie dei pannelli si è utilizzato sia il linguaggio Java che C++. È stato realizzato uno script capace di generare una lista di vertici appartenenti ai rispettivi triangoli a partire da input diversi per ogni tipo di figura geometrica.

Lo spazio viene gestito in 3 dimensioni con assi cartesiani  $x$  (est-ovest),  $y$  (nord-sud), e  $z$  altezza rispetto al suolo (i.e., normale al suolo nel punto dell'osservatore).

Il suolo è considerato un piano del tipo  $z=R$  (reale) parallelo al piano  $x,y$ . Valori negativi di  $z$ , ancorché significhi di avere una parte dell'installazione "immersa" nella Terra, sono consentiti per una migliore visualizzazione della forma geometrica. Il software di simulazione non tiene conto dell'altezza  $z$ .

Per tutte le geometrie studiate abbiamo discretizzato la superficie del pannello in triangoli (secondo il metodo agli elementi finiti) in modo da creare algoritmi che permettessero di calcolare tre vertici assicurandoci che ogni lato non di confine fosse comune a due triangoli.

Sono state sviluppate tre superfici di prova: ondulato, cono e semicerchio (tettoia curva).

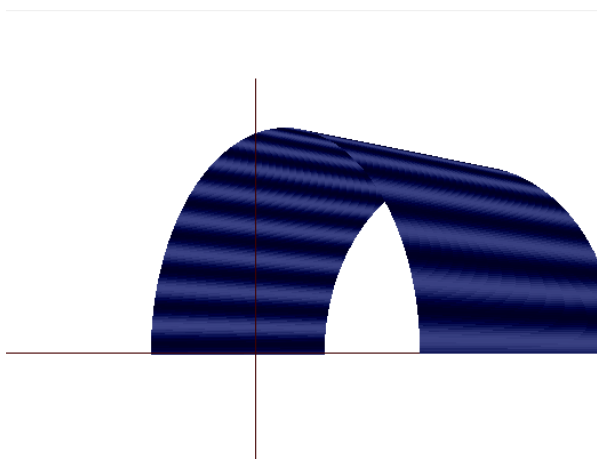


Figura 12 - Forma geometrica a semicerchio (tettoia curva)

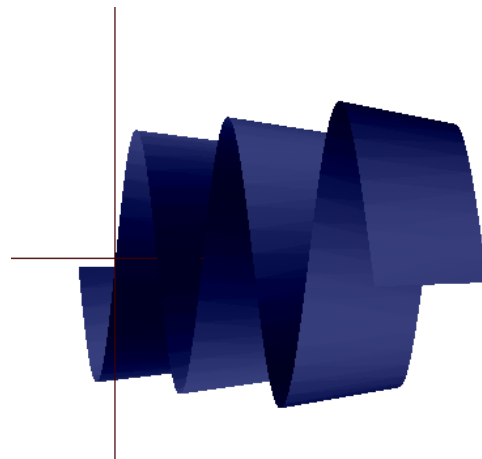


Figura 13 - Forma geometrica ondulata

Per la discretizzazione in triangoli abbiamo usato due metodi: un metodo di “traslazione/estrazione”, ove la figura viene generata sul piano e poi traslate nello spazio per fornirla di tridimensionalità (ondulato e parabola); un metodo di “rotazione” ove si fissano uno o due vertici e si generano i triangoli dividendo la base.

Per la creazione delle superfici di traslazione si disegna la curva sul piano  $x, z$  - ad esempio  $z = A \sin(\omega x + \varphi)$  - che definisce la sezione della superficie. La curva viene suddivisa ad intervalli regolari e idealmente traslata su un piano  $y = \text{profondità della figura}$ . Tale piano è parallelo al piano  $x, z$  originario. Per ogni due punti contigui sulla curva originaria esistono due punti speculari corrispondenti sulla curva traslata. Questi quattro vertici formano un quadrilatero e permettono la creazione di due triangoli che condividono la diagonale del quadrilatero.

La creazione delle superfici “di rotazione” avviene fissando il vertice della nostra figura e utilizzando coordinate polari si disegna la curva di base sul piano  $x, y$  (nel caso del cono, una circonferenza). Si divide la curva così ottenuta in intervalli fissi (generalmente un delta di angolo), e ciascuno dei segmenti ottenuti forma la base per un triangolo che connette il segmento con il vertice.

Per ogni figura nel file viene salvata anche la direzione al fine di permettere, in fase di simulazione, di ricostruire quale faccia del pannello sia quella assorbente.

I vertici vengono scritti in un formato pseudo .stl testuale, in modo da poter essere letti facilmente dall'applicativo. Ogni riga del file contiene le coordinate  $x, y$  e  $z$  dei tre vertici del triangolo, e la direzione della superficie assorbente.

### Analisi delle figure di prova – esempio del cono

E' stato modellato un cono di raggio pari a 3 m e altezza pari a 4 m, avente superficie assorbente sulla superficie curva (la base poggia sul piano del terreno e non è assorbente). La circonferenza della base è stata divisa in 62 segmenti (arco di angolo pari a 0.1 rad), a cui corrispondono 62 triangoli.

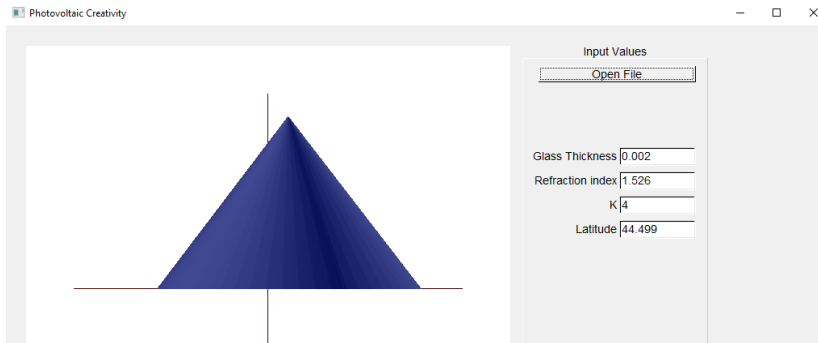


Figura 14 - Rappresentazione grafica della forma conica dell'installazione

La superficie netta assorbente ricostruita è pari a 47.21 m, molto simile all'area di 47.12 m della figura geometria astratta. La simulazione ha prodotto il seguente grafico 3D caratteristico di assorbimento annuale:

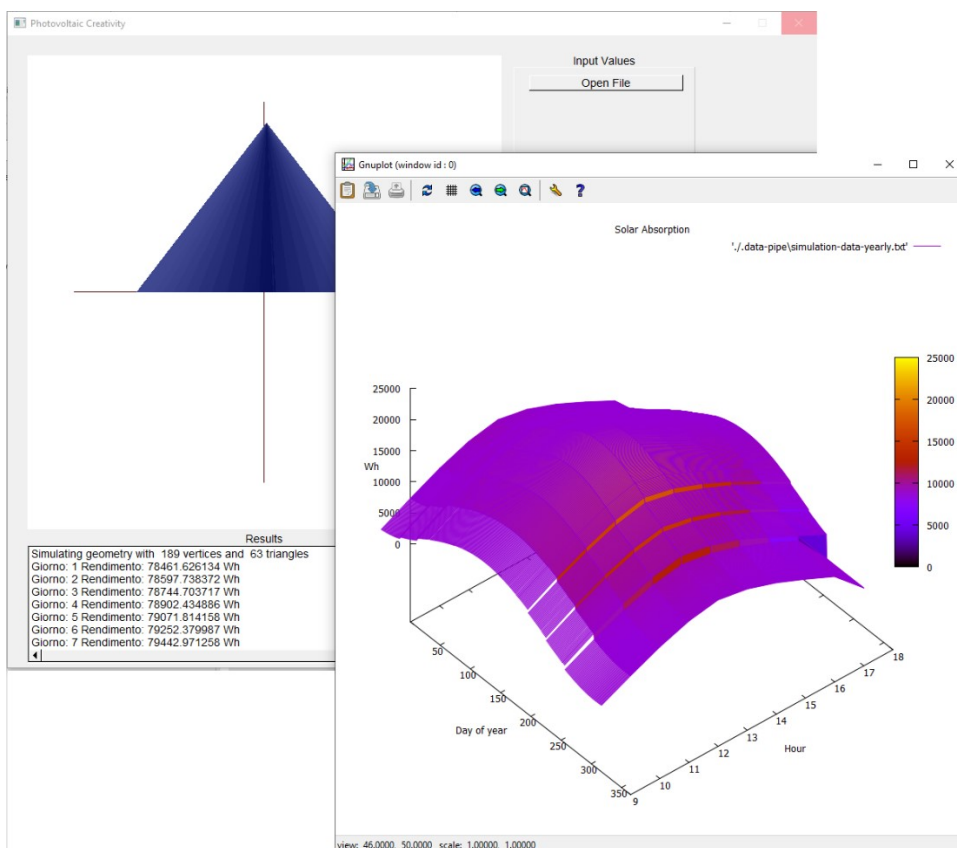


Figura 15 - Grafico 3D di rendimento annuo dell'installazione, scomposto per giorno e ora del giorno (1-365 giorni, dalle 9 alle 18).

Come era ragionevole attendersi, la forma conica permette di massimizzare gli assorbimenti invernali e nelle ore mattutine e serali, anche se per una dimensione di 47 metri quadri il rendimento complessivo annuale non è ottimale.

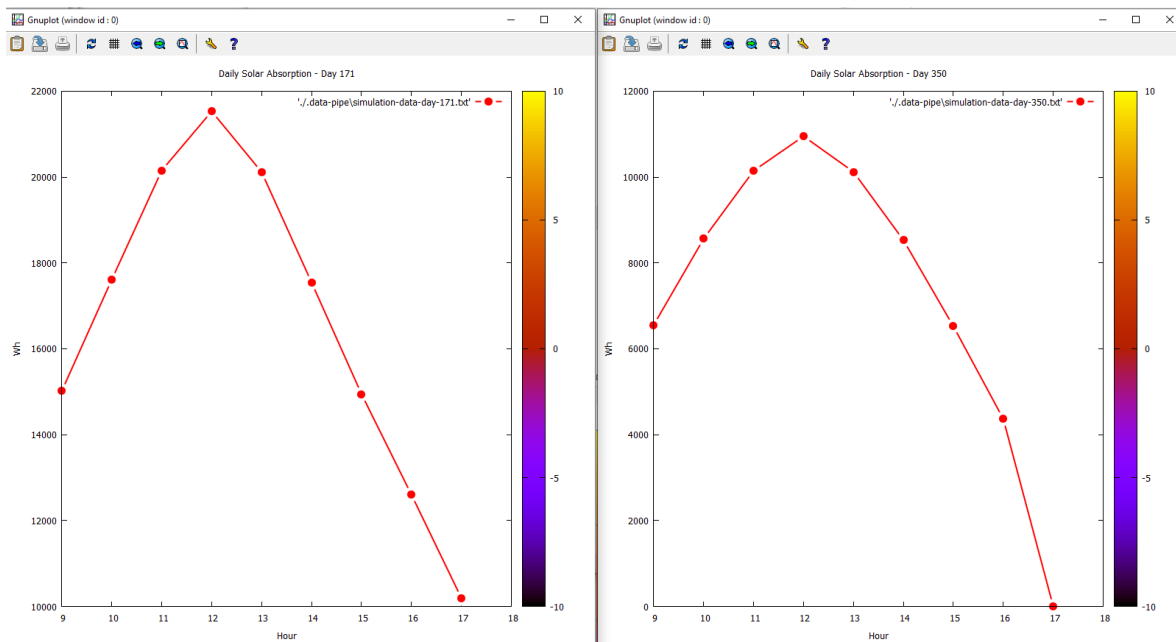


Figura 16 - Grafici di irraggiamento giornaliero dell'installazione a forma conica, rappresentanti una delle giornate di massimo e una delle giornate di minimo

Il massimo di produzione si ottiene a giugno con un picco massimo di irraggiamento assorbito giornaliero di 162.4 kWh, il minimo a dicembre con un minimo di irraggiamento giornaliero di 70 kWh.

## 6. Conclusioni

L'obiettivo del progetto è di simulare il rendimento di un'installazione fotovoltaica avente geometria non planare. A tal scopo si è proceduto a creare un modello teorico di irraggiamento solare e assorbimento che tenesse conto delle variabili di maggior influenza (posizione del sole, posizione e angolo relativo del pannello o di ogni sua componente, massa d'aria).

Tale modello è stato sottoposto a verifica sia attraverso il confronto diretto con i dati di irraggiamento contenuti in database, sia tramite le rilevazioni di irraggiamento raccolte nel corso del progetto. A tal fine è stata costruita un'installazione composta da pannello solare, circuito di carico e strumenti di misurazione, al fine di raccogliere dati. Le verifiche proposte hanno sostanzialmente confermato la validità del modello, mostrando deviazioni solo verso gli estremi delle variabili.

E' stato successivamente implementato un software per l'implementazione del modello, al fine di produrre una simulazione dei risultati. Tale software permette di caricare una geometria tridimensionale qualsiasi, scomporla in costituenti triangoli che descrivono la figura iniziale, e per ciascun triangolo simulare la possibile produzione dipendente direttamente dalla radiazione luminosa assorbita. Tale software è stato implementato in C++ con l'uso delle librerie FLTK, Boost e OpenGL.

Il risultato della simulazione è sia scritto in forma testuale su file, sia plottato in grafici 3D del rendimento annuo e grafici 2D del rendimento orario giornaliero. Per la creazione dei grafici ci si basa sul software GnuPlot.

## 7. Bibliografia

- Kalogirou S. A., 2014, Solar energy engineering 2<sup>nd</sup> Edition, Academic Press
- De Soto W., Klein S., Beckman W. A., 2006, Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance, Solar Energy, Volume 81, Issue 1, January 2007, Pages 150
- NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER), Database Climatology Resource for Agroclimatology, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Fanney A.H, Davis M.W, Dougherty B., 2002, Evaluating building integrated photovoltaic performance models, Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE
- Bouraiou A., Hamouda M., Chaker A., Sadok M., Mostefaoui M., Lachtar S., 2015, Modeling and Simulation of Photovoltaic Module and Array based on One and Two Diode Model Using Matlab/Simulink, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability;
- Villalva M. G., Gazoli J. R., Filho E. R., 2009, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 24 , Issue 5

- Khronos, [https://www.khronos.org/opengl/wiki/How\\_lighting\\_works](https://www.khronos.org/opengl/wiki/How_lighting_works)
- OpenGL Faq n. 8, <https://www.opengl.org/archives/resources/faq/technical/viewing.htm>
- GnuPlot, <http://www.gnuplot.info/download.html>