Photovoltaic Creativity

Duccio Marco Gasparri, Matteo Pirazzini, Andrea Tallaros, Alessandro Freda

# 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 di anidride carbonica e di calare la produzione di energia elettrica dovuta ai combustibili fossili, quali petrolio e carbone, che oltre ad essere una risorsa limitata, sono anche altamente inquinanti. Possiamo perciò dire che le energie rinnovabili che sfruttano eventi e/o fenomeni naturali (senza creazione diretta di anidride carbonica) sono il futuro della creazione di energia elettrica. Nel nostro progetto ci concentreremo sul fotovoltaico, una tecnologia ormai molto diffusa che sfrutta l'energia solare per generare elettricità.

Il progresso degli studi fotovoltaici ha portato a ideare pannelli con geometrie che seguissero figure non planari al fine di essere maggiormente integrati all'interno delle architetture degli edifici stessi. Lo scopo di questo progetto è appunto quello di capire come la diversa geometria del pannello influisca sulla produzione del sistema fotovoltaico.

Per iniziare facciamo una descrizione a grandi linee di ciò che andremo a studiare.

In modo molto semplice il nostro sistema si compone del Sole che attraverso la radiazione luminosa che attraversa lo spazio e l’atmosfera colpisce il nostro pannello fotovoltaico, che si trova in una qualche posizione nello spazio sulla Terra, che andrà a produrre una certa quantità di corrente elettrica proporzionale alla radiazione luminosa assorbita. Per semplificare il nostro sistema lo abbiamo diviso nelle sue tre componenti principali, ovvero il Sole, il pannello e la radiazione luminosa.

# Posizione del Sole

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

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]:

Vengono così definiti gli angoli limiti 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 al di fuori dell’intervallo (-,) l’insolazione è zero per costruzione.

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

L’angolo di Azimut dipendente dall’altitudine solare [Eq 4, gradi]:

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]:

Data la costante solare (pari a 1366.1 ) si calcola la radiazione che raggiunge una superficie orizzontale extra-atmosfera (radiazione extraterrestre misurata sul piano normale alla radiazione dell'ennesimo giorno dell'anno) [Eq 6, ]:

Si ricava poi la radiazione incidente su una superficie orizzontale extraterrestre ad un certo tempo dell’anno (dipendente dall’angolo di Zenith ) [Eq 7, ]:

La radiazione totale giornaliera incidente su una superficie orizzontale extraterrestre si ricava integrando lungo il corso della rotazione terrestre di 360° tramite l’angolo , 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 [] essendo, fuori da tale intervallo, zero per costruzione [Eq 8, si tiene conto della simmetria rispetto all’asse, ]:

La costante temporale è espressa in radianti. Convertendola in secondi si ottiene la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata [Eq 9, ][[1]](#footnote-1):

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)[[2]](#footnote-2), database *Climatology Resource for Agroclimatology*, le serie *Top-of-atmosphere insolation* (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m^2/day) e la *All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface* (codice ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m^2/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 e indicato con il termine .

|  |  |
| --- | --- |
| Mese |  |
| Gennaio | 61% |
| Febbraio | 64% |
| Marzo | 67% |
| Aprile | 67% |
| Maggio | 67% |
| Giugno | 67% |
| Luglio | 67% |
| Agosto | 67% |
| Settembre | 64% |
| Ottobre | 61% |
| Novembre | 55% |
| Dicembre | 55% |

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 è [Eq 10, ]:

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

Con e così calcolate[Eqq 12 e 13]:

Si definisce la quota di radiazione totale G su una superficie orizzontale [Eq 14

, ]:

Si calcola ora la quota di radiazione diretta che raggiunge la superficie, e la quota di radiazione diffusa/diffratta 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, , e in radianti]

Che possono essere agevolmente convertita in *Wh* seguendo la formula [Eqq 17 e 18, ]:

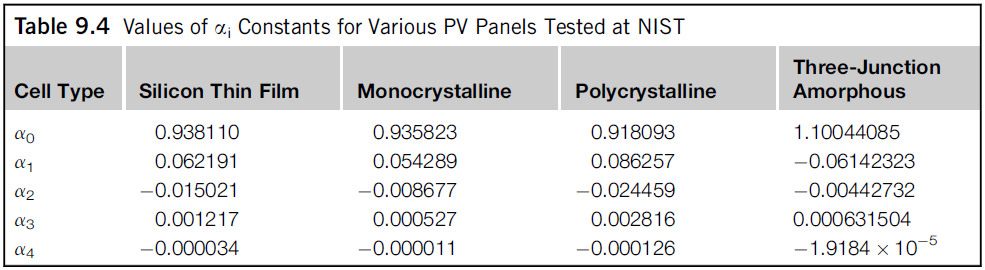
Per costruzione, quindi, la radiazione totale su una superficie orizzontale è la somma della radiazione diretta e della radiazione assorbita dalla massa d’aria e diffusa [Eq 19, ]

# Irraggiamento del pannello

Per ogni micro-pannello che compone il pannello, viene calcolato l’anglo di inclinazione del pannello in gradi rispetto al terreno, e l’angolo 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 , che si ottiene attraverso la seguente formula [Eq 20, gradi]:

L’attraversamento dell’atmosfera dai raggi solari produce non solo un effetto di assorbimento e rifrazione, ma anche uno shift dello spettro dei raggi solari. L’impatto finale di questo shift dipende dalle caratteristiche “chimiche” e costruttive del pannello. Tale effetto è stato ottenuto sperimentalmente e descritto tramite una regressione a coefficienti dati dalle prove di laboratorio e dalla massa d’aria m in precedenza calcolata [Eq 21] :



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

Il modificatore correttivo per l’indice di rifrazione che include la trasmittanza [Eq 22] e dipende dallo spessore del pannello e dal coefficiente di estinzione del sistema fotovoltaico K secondo la seguente formula [Eq 23]:

Il modificatore correttivo di incidenza angolare viene invece calcolato nel seguente modo[Eq 24]:

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 per ciascuna delle due componenti, secondo le seguenti relazioni [Eqq 25 e 26]:

Ancorché empirico, 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 e verranno rinominati rispettivamente e .

Da cui si ricava il modificatore dell'angolo di incidenza [Eq 27 (pag516)]:

La stessa sequenza di equazioni, ovvero *Eq 24 ed Eq 27*, si può applicare ai e ricavando [Eqq 28 e 29]:

Con i relativi [Eqq 30 e 31]:

La radiazione solare diretta sul pannello ci permette di calcolare la radazione solare su una superficie orizzonale [W/m^2], dipendente dall’angolo di Zenith, e la radiazione solare su una superficie inclinata [W/m^2], dipendente dall’angolo di incidenza [Eqq 32 e 33]:

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 [Eq 34]:

La composizione dei fattori correttivi sopra calcolati permette di comporre la radiazione solare assorbita dal pannello ad una determinata ora del giornoh, in un determinato giorno dell’anno N che denotiamo con *S* [Eq 35][[3]](#footnote-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 XX m² e si confrontano i differenti risultati ottenuti a diverse inclinazioni-angolazioni rispetto ai dati della simulazione.

## Raffronto tra dati calcolati e dati rilevati

Si procede ad un primo confronto tra la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata 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)[[4]](#footnote-5), 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^2/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^2/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 “tarati” 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.

Ricordiamo che un β pari a zero corrisponde ad un pannello posto in orizzontale parallelo alla superficie terrestre (ignorando eventuali pendenze del terreno), mentre un β pari a 90° corrisponde ad un pannello posto verticalmente ad angolo retto.

I dati sono verosimili a quanto ci si aspetterebbe nella realtà. L’irraggiamento tra i 200 e i 750 W/m² 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 β di 65°. 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°.

La sensibilità dell’assorbimento S rispetto alla variazione dell’angolo est-ovest Z\_S è riportata in Figura XX

Gli angoli β di 60° e di 27° 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 di -90° corrisponde ad un pannello con la superficie assorbente orientata verso Est, un angolo di 0° corrisponde ad un pannello orientato verso sud, e un angolo di 90° 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 si trova a circa 15°.

Anche in questo caso, i dati ottenuti sono verosimili con quanto può essere rilevato empiricamente. Più l’angolo del pannello si discosta dal 15°, più la superficie assorbente tende ad essere *di profilo* rispetto ai raggi solari diretti. La maggior pendenza del pannello (β di 60°) 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 durante i mesi invernali che durante i mesi estivi.

## 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 β) e di orientamento est-ovest (parametro ) 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 β e .

Le specifiche tecniche del pannello apposte sul retro dello stesso riportano in condizioni standard di test 1000W/m2 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 m², ed è senza marca.

E’ stato collegato al pannello un carico resistivo misurato di (32.8±0.3) Ω, sufficiente vicino all’ottimo dichiarato in etichetta di 31.9 Ω. Il resistore di potenza, di complessivi (30±1.5) Ω 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°, massimizzando la dissipazione.

Il pannello è stato integrato in una struttura in legno mobile che ne permette di regolare manualmente l’inclinazione rispetto alla superficie (parametro β) in un range da 0 a 90°, e – ruotando la struttura – la declinazione della normale rispetto al sud geografico (parametro ). Il β è stato misurato con un Bosch Professional GLM 50 C (incertezza dichiarata dal produttore ±0.2°). 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 ±0.2’.

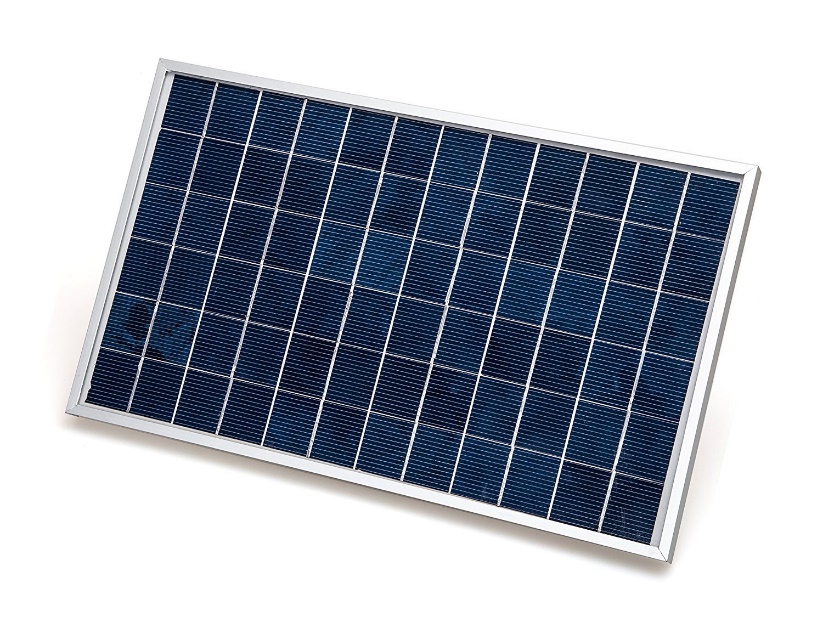


Figura 2 Vista frontale del pannello

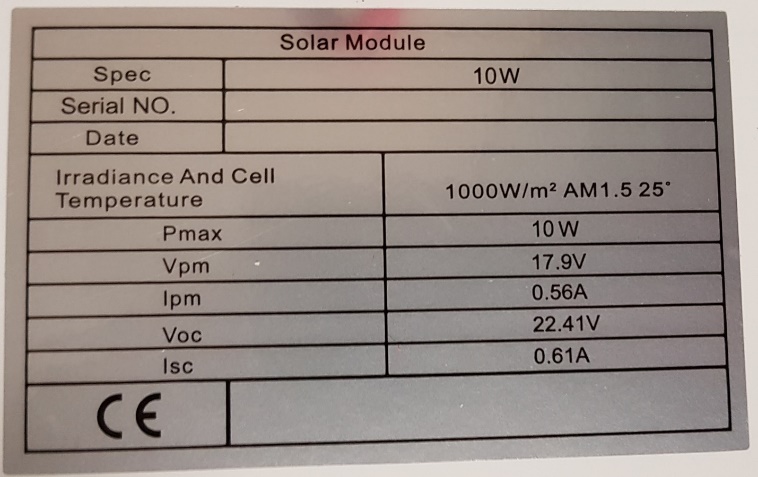


Figura 3 Etichetta con specifiche tecniche riportate sul retro del pannello

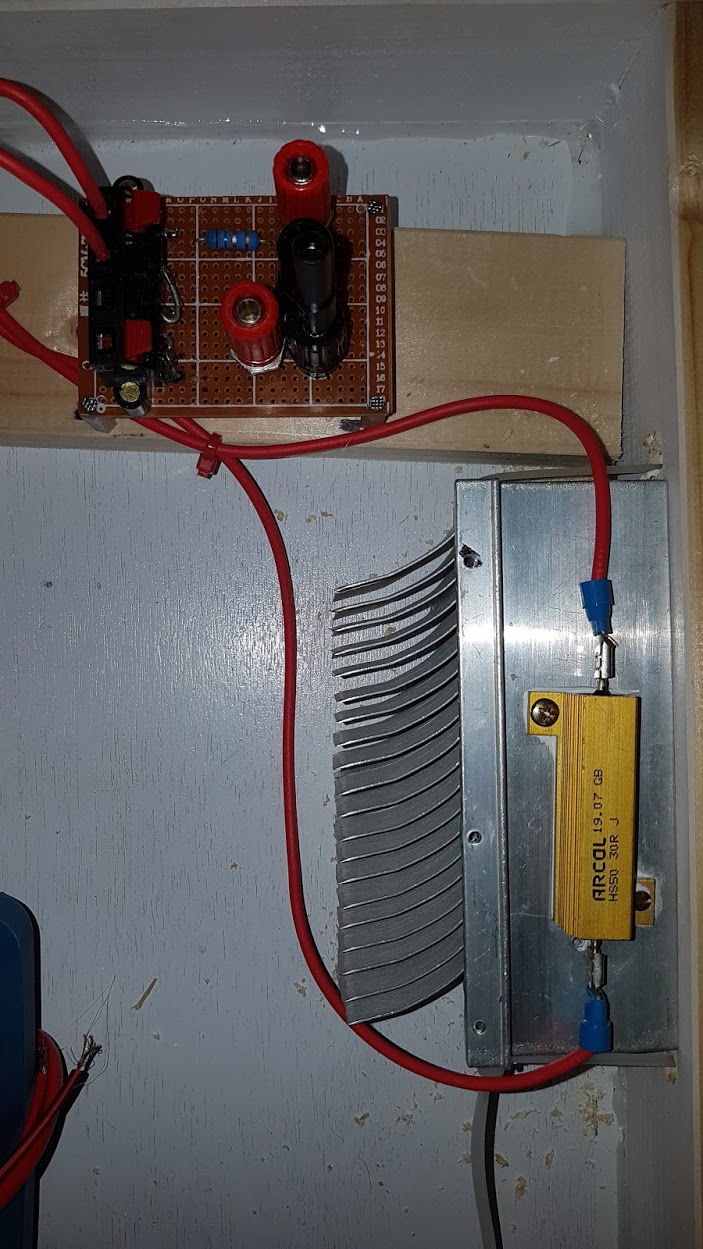


Figura 4 Carico resistivo di 32.8 Ohm montato su dissipatore di alluminio

In una giornata di cielo sereno si è proceduto a variare il β e del pannello in posizioni prestabilite, rilevando la resa effettiva in W.

I dati empirici rilevati sono… [da tabella pv-creativity/doc/rendimento pannello.xlsx ]:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| posizione: (Università di Bologna, day 30 (30 Gennaio), hour 12 | | | | | |
| Posizione del Sole: | |  |  |  |  |
| **β** |  |  |  | **S** | **% rispetto al massimo** |
| 30 | 0 | 595 | 5 | 600 | 88% |
| 30 | 15 | 584 | 5 | 589 | 86% |
| 30 | 30 | 551 | 5 | 556 | 81% |
| 15 | 0 | 469 | 1 | 471 | 69% |
| 15 | 15 | 464 | 1 | 465 | 68% |
| 15 | 30 | 446 | 1 | 447 | 65% |
| 0 | 0 | 302 | 0 | 302 | 44% |
| 0 | 15 | 302 | 0 | 302 | 44% |
| 0 | 30 | 302 | 0 | 302 | 44% |
| 45 | 0 | 676 | 8 | 684 | 100% |
| 90 | 0 | 630 | 32 | 662 | 97% |
| 90 | 15 | 608 | 33 | 641 | 94% |
| 90 | 30 | 542 | 36 | 578 | 85% |
| 90 | 45 | 436 | 38 | 474 | 69% |
| 90 | 60 | 291 | 40 | 331 | 48% |
| 90 | 90 | 0 | 41 | 41 | 6% |

I dati rilevati confermano la percentuale relativa dei cambiamenti alla variazione dei β e degli .

Viene tuttavia smentita l’ipotesi che il modello nel complesso sottostimi l’irraggiamento nei mesi invernali. Difatti, il rendimento di …

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bologna, ore 13:25 del 17 gennaio 2020 | | | |  |  |  |
| **β** |  | **V** | **A** | **W** | **S Rilevato** | **S Stimato** | |
| 30 | 0 | 11.41 | 0.356 | 4.06 | 406.2 | 476.8 |
| 47 | 15 | 13.24 | 0.411 | 5.44 | 544.2 | 595.7 |
| 18 | 0 | 6.22 | 0.192 | 1.19 | 119.4 | 383.1 |
| 47 | 0 | 13.72 | 0.427 | 5.86 | 585.8 | 569.3 |
| 62 | 0 | 14.48 | 0.451 | 6.53 | 653.0 | 608.5 |
| 88 | 0 | 11.80 | 0.378 | 4.46 | 446.0 | 587.4 |

# Implementazione software

Il software è composto da tre 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 (**pv-creativity**);
* uno script a riga di comando di basso livello per le operazioni di verifica e debugging delle librerie (**pv-commandline**);
* un insieme di script Java per la creazione di alcune geometrie comune di pannelli (**geometries**).

Tutto il codice si può trovare su GitHub nel repository https://github.com/dgasparri/pv-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 .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;

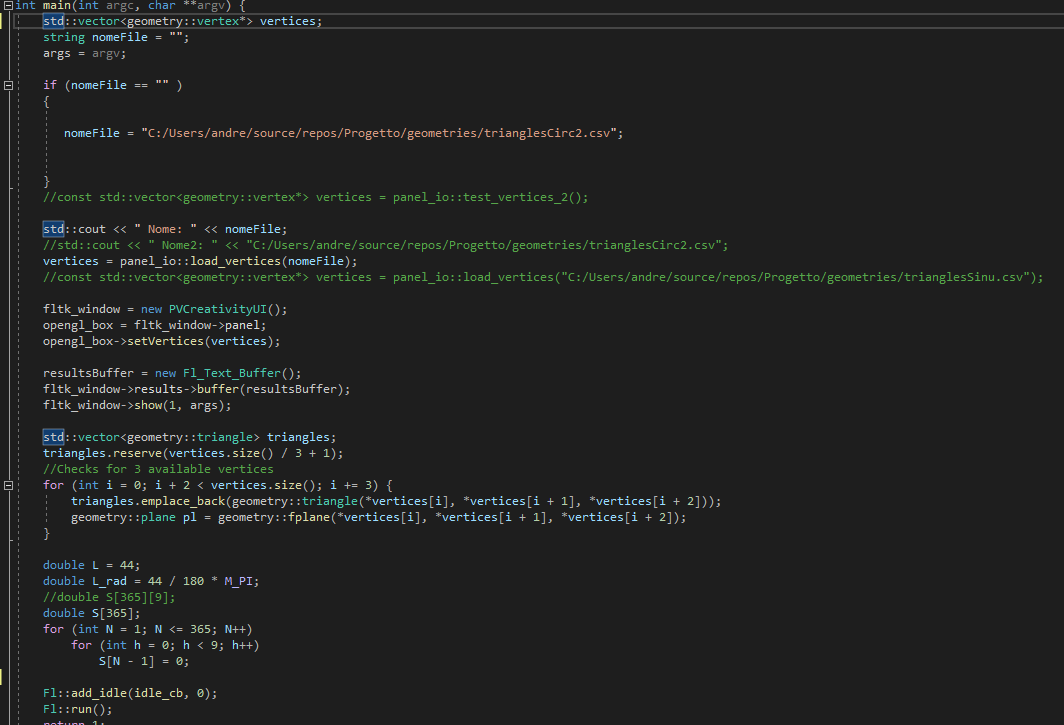
Lo sviluppo della libreria ha seguito quanto illustrato nella presente relazione.

## Applicativo eseguibile con interfaccia per la simulazione

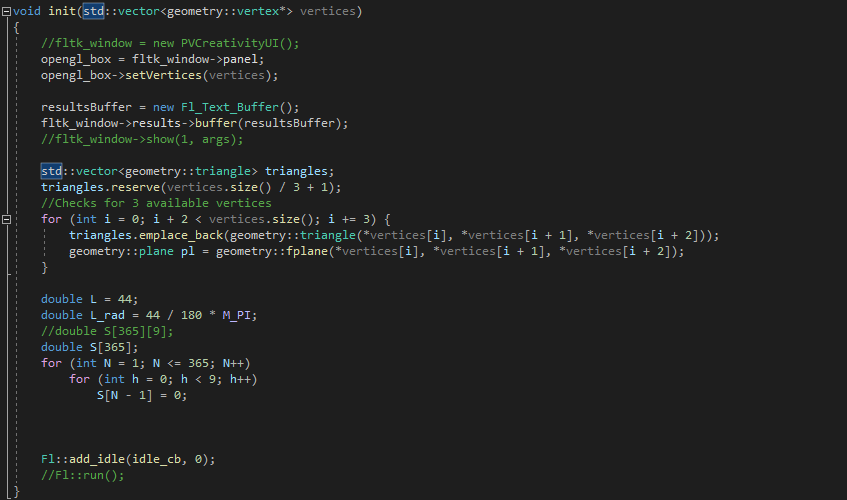
L’applicativo è stato redatto in C++ e si basa su un’interfaccia grafica FLTK, sulla libreria di simulazione per la creazione dei dati, e sul programma di elaborazione grafica GnuPlot. È stato compilato con Visual Studio 2019 su piattaforma Windows.

L’applicativo carica i file delle geometrie dei pannelli in formato .stl e ne fornisce una rappresentazione grafica nel riquadro.

Dopo aver definito alcune variabili globali in un header comune, si va ad assegnare dinamicamente il file pre-selezionato e si conclude con lo istanziare gli elementi atti a far visualizzare la forma.



Quando si va a selezionare il file il metodo init(vertices) viene chiamato dal main ma senza fare il Fl::run(). Basta solo aggiornare lo idle state e chiamare il metodo draw() del panel. Facendo così si puó far caricare al programma qualunque tipo di file senza interruzio



Per cercare di far vedere come la luce illumina i vari pannelli sono stati usati varie funzioni di GLUT. Dopo aver definito la posizione della luce bianca con l’esecuzione del programma si puó notare come la luce “casca” sulla superficie dei pannelli.

Successivamente si effettua una simulazione del rendimento del pannello su tutto il periodo dell’anno secondo i seguenti parametri: giorno tra 1 e 365, ora tra 9 e 18. I dati vengono scritti su un file di output… come?

In un thread separato viene poi invocato GnuPlot al quale viene dato il file da analizzare per fare il plot…

L’immagine di plot generata da GnuPlot viene caricata nell’interfaccia e visualizzata all’utente.

## 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 della libreria, 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 abbiamo deciso di utilizzare il linguaggio Java. 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,y,z secondo i seguenti orientamenti:

* verso positivo asse x: est
* verso positivo asse y: nord
* verso positivo asse z: altezza rispetto al suolo (normale al suolo nel punto dell’osservatore)
* verso negativo asse x: ovest
* verso negativo asse y: sud
* verso negativo asse z: altezza rispetto al suolo (normale al suolo nel punto dell’osservatore).

[N.B. il suolo lo consideriamo un piano del tipo z=a (a Reale), piano parallelo al piano x,y in modo da avere l’intero pannello al più poggiante sul suolo, evitando di avere parti immerse nella Terra].

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 calcolarne i tre vertici assicurandoci che si trovassero tutti su uno stesso piano (infatti sappiamo che in tre dimensioni per tre punti passa uno ed un solo piano). Abbiamo perciò di studiare alcune geometrie utili che potessero permetterci di discretizzare la maggior parte delle superfici reali esistenti, ovvero: ondulati, rami di parabola, cilindri, piani, piramidi, coni e sfere.

Per quanto riguarda la modellizzazione delle superfici prese in esame abbiamo usato due metodi di base per discretizzarli in triangoli.

I primi cinque modelli sopra elencati sono superfici che chiameremo “di traslazione” ovvero sono figure piane che poi vengono traslate nello spazio per fornirle di tridimensionalità. Le restanti invece sono superfici che definiamo “di rotazione” in quanto sono figure che discretizziamo fissando uno o due vertici e generiamo i triangoli dividendo la base.

La creazione delle superfici “di traslazione” avviane seguendo tre passaggi:

* Sul piano x,z studio la curva (per esempio del tipo z=a\*x) che mi definisce la sezione della superficie
* Sul piano y,z do la profondità della superficie (ovvero idealmente traslo la sezione calcolata sul piano x,z nello spazio fino ad ottenere una superficie tridimensionale)
* Raggruppo i punti calcolati sequenzialmente in insiemi di tre in modo da avere dei triangoli. Quello che otteniamo sono due triangoli che creano un rettangolo che individuano uno stesso piano.

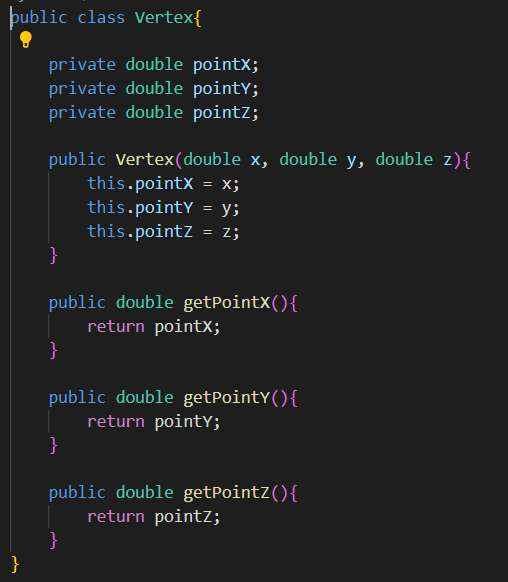
La creazione delle superfici “di rotazione” avviane seguendo tre passaggi:

* Si fissa un punto che è il vertice della nostra figurae una circonferenza di base (nel caso di una sfera/“diamante”, invece, fisso due vertici “antipodali” (devono essere antipodali rispetto alla circonferenza di base nel caso si voglia discretizzare una sfera, invece nel caso di un “diamante” i due punti devo essere uno da un lato e uno dall’altro della circonferenza senza essere obbligatoriamente antipodali));
* Preso il vertice come punto comune a tutti i triangoli, calcolo gli altri due vertici dividendo la circonferenza di base in segmenti (nel caso della sfera prendo come circonferenza l’unica equidistante dai due punti scelti nel punto precedente, ogni segmento indica la base per 2 triangoli che hanno rispettivamente come terzo vertice i due punti di prima. Ragionamento simile nel caso del “diamante” dove però la circonferenza non si troverà obbligatoriamente a metà fra i due vertici ma potrà essere in una qualsiasi posizione dello spazio fra i 2 vertici fissati. Concettualmente, in entrambi i casi, è come se incollassimo 2 coni per le basi)
* A questo punto ogni terna di punti sopra definiti trova un triangolo.

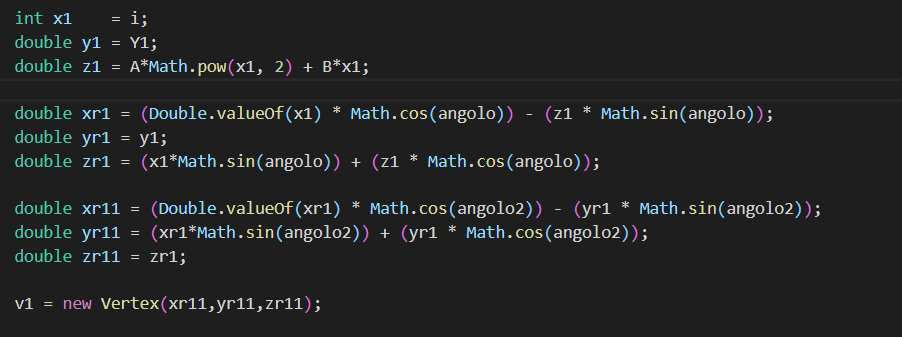
Il passo successivo alla creazione delle superfici in modo “comodo” rispetto agli assi cartesiani ruotiamo il pannello per intero rispetto all’angolo (inclinazione rispetto al piano del suolo, ovvero rotazione attorno all’asse y) e all’angolo (rotazione rispetto all’asse y, cioè rotazione attorno all’asse z).

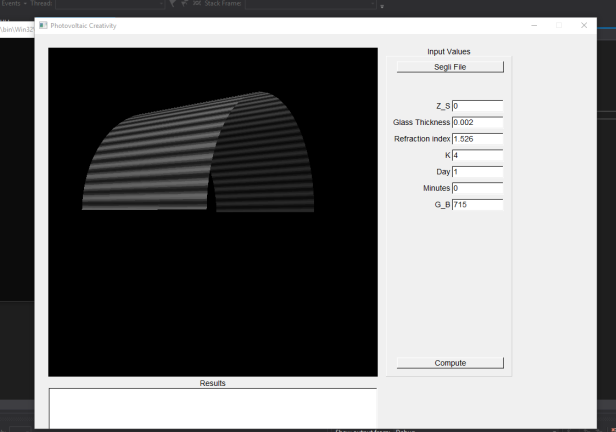
I vertici vengono scritti in un formato .stl testuale modificato e semplificato, in modo da poter essere letti facilmente dall’applicativo. Il file è strutturato in questo modo:

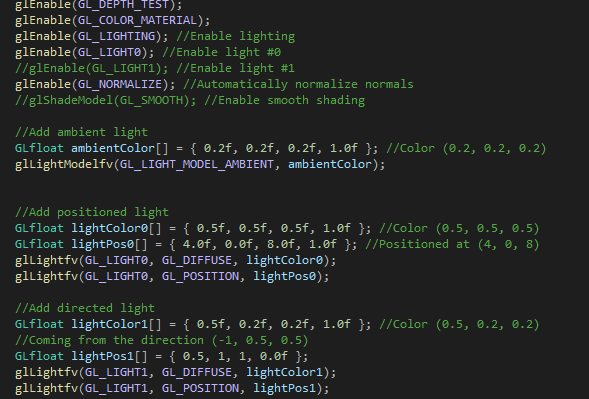
* ci sono tre colonne, ogni colonna contiene il vertice del triangolo, dunque le posizioni x y z
* da ogni 3 vertici viene ricostruito il triangolo.

Abbiamo definito una classe Vertex relativa al vertice dei triangoli che ha la seguente struttura:

Lo script è composto da diversi metodi che corrispondono alle diverse figure geometriche, ogni metodo prende in input diversi valori. A seconda delle figure gli input cambiano. All’interno di un ciclo for il cui numero di cicli viene definito in input, vengono creati quattro vertici, a partire da questi quattro vertici vengono scritti nel file CSV due triangoli, dunque ogni ciclo genera due triangoli. Di seguito un esempio di creazione di vertice relativo alla parabola:







# Conclusioni

L’obiettivo finale che ci eravamo presupposti con questo progetto è stato fin dall’inizio di riuscire a creare un software in grado di prendere una geometria tridimensionale qualsiasi, scomporla in tanti triangoli e a quel punto pensare che fossero tutti dei micro-pannelli che compongono un unico grande pannello fotovoltaico al fine di riuscire a calcolare, poi, la possibile produzione dipendente direttamente dalla radiazione luminosa assorbita. Attraverso lo studio di un ipotetico pannello fotovoltaico nello spazio siamo riusciti a semplificare il sistema teorico per renderlo calcolabile tramite un applicativo in codice C++ e visualizzabile su un’interfaccia grafica FLTK, sulla libreria di simulazione per la creazione dei dati, e sul programma di elaborazione grafica GnuPlot. Al fine di avere un riscontro pratico della validità del nostro software abbiamo acquisito dati empirici da un pannello fotovoltaico in nostro possesso e dando in pasto al nostro programma i dati trovati siamo riusciti a vedere quanto il nostro software sia una buona approssimazione della realtà dei fatti, con risultati più che positivi.

# Bibliografia

* Kalogirou - 2014 - Solar energy engineering processes and systems;
* Ahmed Bouraiou, Messaoud Hamouda ,Abdelkader Chaker, Mohammed Sadok, Mohammed Mostefaoui, Salah Lachtar - 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 Sustainibility;
* Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho - 2009 - Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays
* 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^2/day) e la *All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface* (codice ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m^2/day)

1. Per la conversione in radianti bisogna tenerne conto in π/180 , e non riconvertirlo se si hanno già i radianti per

   dove è l’angolo orario corrispondente al tramonto. [↑](#footnote-ref-1)
2. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [↑](#footnote-ref-2)
3. 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 e . [↑](#footnote-ref-4)
4. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [↑](#footnote-ref-5)