



L'IMPIANTO FOTOVOLTAICO



Analisi della produzione di energia da parte di un impianto fotovoltaico da installare presso l'I.S.I.S.S. "M.Casagrande" e stima dei tempi di ammortamento della spesa

A cura di D'Agostino Andrea, Lorenzon Gioella, Piccolo Simone, Sech Edoardo, Sadak Ikram, Xu Jingjing, Arghittu Nicola, Berti Andrea, Ceotto Chiara, Mufato Leonardo, Buffon Laura, Carniel Chiara, Lucchetta Jessica, Spadetto Luca, Stefani Antonio, Dorigo Martina, Maninchedda Luigi, Barisan Anna, Dalla Libera Andrea, De Faveri Andrea, Galatanu Razvan, Pizzardo Andrea, Rebeschini Leonardo, Zanin Pietro

Realizzato nell'ambito del **Progetto Archimede**
con la supervisione dei Proff. F.Breda, V.Fabbro e F.Zampieri
I.S.I.S.S. "M.Casagrande", Pieve di Soligo, Dicembre 2014

Sommario

In questo lavoro ci occupiamo della progettazione di un impianto fotovoltaico da installare presso l'I.S.I.S.S. "M.Casagrande", in località Pieve di Soligo (TV). Verrà inizialmente analizzato il fabbisogno energetico (per quanto riguarda i consumi di energia elettrica) dell'Istituto, mediante l'analisi dei dati del consumo giornaliero in KWh desunti dal portale infocad.gsmtreviso.it della Provincia di Treviso. In funzione di questo parametro, verrà proposto un possibile dimensionamento dell'impianto, in termini di superficie e di potenza producibile, sulla base delle realistiche possibilità per l'edilizia. In secondo luogo verrà stimata l'energia realmente producibile dall'impianto simulando giorno per giorno le condizioni di illuminamento alla latitudine e longitudine a cui si trova la scuola, tenendo conto delle statistiche sulle condizioni meteorologiche (misurando anche sperimentalmente alcuni coefficienti di estinzione dovuti alle condizioni meteo avverse). Infine, si confronterà l'energia realmente prodotta con il fabbisogno reale, stimando i tempi di ammortamento dell'impianto, una volta calcolati i costi economici e tenendo conto dei contratti e degli incentivi per gli impianti fotovoltaici.

1 Introduzione

Un impianto fotovoltaico, come è noto, permette di produrre corrente elettrica da una risorsa praticamente inesauribile: la luce solare. Il meccanismo con cui viene generata l'energia si basa su uno dei fenomeni che prevedono l'interazione fra la radiazione e la materia, il cui studio contribuì, nei primi anni del secolo scorso, a determinare la cosiddetta crisi della fisica classica: l'effetto fotoelettrico. Mediante tale interazione, un'onda elettromagnetica che incide su un atomo di un elemento semiconduttore (di solito silicio) avente una frequenza f maggiore di un certo valore detto *di soglia* (nel caso del silicio appartenente alla banda *IR*) viene assorbita dagli elettroni, i quali, disponendo di un'energia maggiore di quella di legame, possono essere immessi in un circuito. Si determina così la propagazione macroscopica di una corrente elettrica: sulla produzione e l'utilizzo della corrente elettrica si fonda gran parte della nostra tecnologia e il grado di benessere che la nostra vita quotidiana ha raggiunto.

Spesso, l'utilizzo dell'energia fotovoltaica è sponsorizzato, chiamando in causa tematiche ecologiche e di sostenibilità ambientale, ma da un esame molto preliminare, l'uso dei pannelli fotovoltaici si rivela una tecnologia ancora onerosa dal punto di vista economico. I costi per gli impianti domestici difficilmente sono inferiori ai 10.000 €, e sono significativamente più alti nel caso di strutture pubbliche, comprendendo,

oltre al costo dei materiali (che richiedono sofisticate tecnologie di produzione), anche gli inevitabili oneri di installazione e collaudo. Le spese iniziali però possono essere ammortizzate in periodi di tempo tutto sommato brevi, visto che il costo della materia prima che permette di produrre la corrente è nullo: i tipici tempi di ammortamento raramente superano i $6 \div 8$ anni e sono, almeno in Italia, accorciati anche dagli incentivi statali (che permettono di solito un rimborso del 50% della spesa per opere volte al risparmio energetico).

Tuttavia l'esame altrettanto preliminare di un meccanismo di produzione energetica tutto sommato semplice, ci fa comprendere che sono moltissimi i parametri da cui dipende l'effettiva possibilità di generare energia dalla banale esposizione di un pannello fotovoltaico alla luce solare.

C'è da dire subito che l'effetto fotoelettrico, come tutti i processi fisici di conversione dell'energia, ha un rendimento η che è sempre inferiore all'unità, ossia non è vero che tutta l'energia che arriva dal Sole viene tradotta in corrente elettrica: questo processo in sé non è quindi molto efficiente. Se η è misurato dal rapporto fra l'energia effettivamente tradotta in corrente elettrica e l'energia incidente, secondo la relazione $\eta = \frac{E_{prodotta}}{E_{incomig}}$, questo parametro oscilla tra un valore minimo di 5 – 10% per le celle in silicio amorfo, ai valori di 15 – 17% nel caso delle celle in silicio mono o poli-cristallino. Sono queste le caratteristiche dei materiali effettivamente impiegabili in edilizia, fermo restando che tecniche più sofisticate permettono di elevare anche del doppio i rendimenti, ma rimangono per ora appannaggio più della ricerca scientifica che dell'edilizia privata.

In secondo luogo, l'intensità della radiazione incidente (da cui dipende poi la produzione della fotocorrente) non è costante né durante il giorno (visto che il Sole non permane in cielo per tutto l'arco delle 24 ore ed, anzi, la sua altezza sull'orizzonte varia a seconda del momento della giornata) né durante l'anno (poiché la lunghezza dell'arco apparente descritto dall'astro nel cielo varia da giorno a giorno a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre sul piano dell'eclittica). Ne deriva che la produzione effettiva di energia dipende strettamente sia dal giorno dell'anno che dall'ora del giorno, fino a cessare del tutto durante le ore di buio (nelle quali comunque c'è esigenza di utilizzo!).

Inoltre, le condizioni meteorologiche possono avere una grande influenza, a volte attenuando anche in modo sensibile la radiazione solare, altre volte schermanandola quasi completamente. In altre parole, non serve avere delle celle efficientissime se vengono installate in una zona della Terra estremamente piovosa o magari situata a latitudini troppo elevate (in cui, in altri termini, l'altezza del sole permane bassa per gran parte dell'anno).

Tutte queste considerazioni rendono fondamentale un accurato lavoro di indagine, a monte dell'installazione dell'impianto, volto a determinare se sia effettivamente plausibile l'onere di una spesa economica ingente, alla luce del reale guadagno che essa potrà portare.

E' da ciò che ha preso avvio il presente lavoro: vogliamo, in altri termini, vedere, alla luce di un certo consumo in KWh del nostro Istituto, se un impianto qui installato darebbe un effettivo vantaggio economico, provando a stimare quanta energia solare si possa effettivamente raccogliere in un anno di funzionamento, in questa precisa località della Terra, soggetta a variazioni giornaliere ed annuali dell'illuminamento e a sensibili differenze causate dalle condizioni di copertura del cielo.

Nella prima parte del lavoro, che ha come scopo principale quello di progettare un impianto fotovoltaico da installare sul tetto dell'Istituto "Marco Casagrande" di Pieve di Soligo, verrà calcolato il fabbisogno energetico in termini di energia elettrica della scuola, prendendo come riferimento l'anno 2014.

Successivamente, nella seconda parte, verrà tentato un calcolo dell'energia effettivamente sfruttabile dall'impianto (in termini di conversione in energia elettrica): ci si chiede, alla latitudine e alla longitudine dell'Istituto, in un anno quanta energia arriva sull'intera superficie dell'impianto, tenendo conto di come varia l'altezza del Sole durante ciascun giorno dell'anno, di come variano le condizioni atmosferiche e meteorologiche (operando anche una misura diretta dell'estinzione della radiazione ad opera delle condizioni avverse e facendo riferimento a precise statistiche sulla piovosità e sui giorni di sole).

Nella terza parte, infine, ipotizzando dei rendimenti η plausibili per l'impianto che si vorrebbe installare, sapendo quanta energia si può sperare di produrre mediamente, e a quanto ammonta il fabbisogno energetico, si cercherà di calcolare quali potrebbero essere i tempi di ammortamento dell'impianto, alla luce soprattutto di una stima il più possibile realistica dei costi di installazione.

2 Analisi dei consumi

Per poterci rendere conto di quale sia l'ordine di grandezza della produzione energetica dell'impianto, abbiamo proceduto ad una raccolta dei dati inerenti i consumi energetici dell'Istituto "M.Casagrande" di Pieve di Soligo. Ciò è stato possibile grazie ad un *database* messo a disposizione dal Settore Edilizia della Provincia di Treviso, che gestisce l'edificio scolastico anche per quanto riguarda la spesa energetica. Il nostro Istituto preleva l'energia elettrica dal gestore di rete, sulla base di diversi contratti che fanno riferimento a diversi contatori per altrettanti impianti. E' però possibile risalire ai consumi totali giorno per giorno cumulativi di tutti gli impianti installati e quindi conoscere ogni giorno il numero totale di KWh¹ consumati. Accedendo al portale infocad.gsmtreviso.it, mediante un *login* che la Provincia ha fornito a tutti gli Energy Team delle scuole che aderiscono al progetto Green Schools², si può avere accesso alle statistiche giornaliere dei consumi di tutte le scuole gestite dall'Ente.



Figura 1: Statistica dei consumi energetici dell'Istituto, in questo caso, nel giorno 24/10/2014. Notare l'andamento ora per ora dei consumi di energia elettrica e la cifra totale, a sinistra, dell'intera giornata: 203 KWh

Abbiamo proceduto alla tabulazione giornaliera dei consumi per la nostra scuola, dal 1/1/2014 al 31/12/2014, mediante lettura diretta delle statistiche nel Portale. In questa maniera è stato possibile calcolare il consumo annuale in KWh di energia elettrica, giungendo alle seguenti osservazioni:

1. il consumo annuale ammonta a $E_{tot} = 78.406 KWh$, una cifra ovviamente considerevole se rapportata a quella di un'abitazione! Mediamente, significa un consumo di circa $E_{monthly} = 6500 KWh$ mensili e di circa $E_{daily} = 215 KWh$ giornalieri;

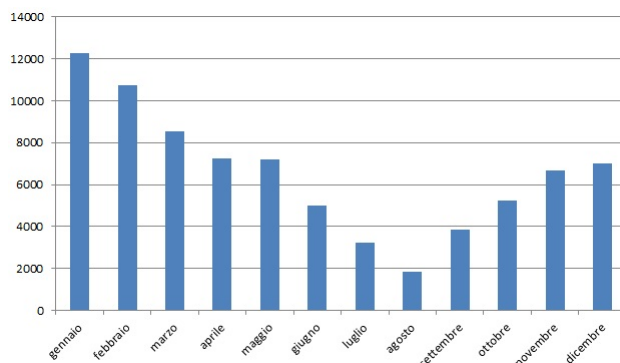


Figura 2: Istogramma mese per mese dei consumi in KWh di energia elettrica dell'Istituto "M-Casagrande"

¹Un KWh è l'equivalente energetico di $3,6 \cdot 10^6 J$

²si veda Sito del Progetto Green Schools

2. il consumo è ovviamente molto variabile nel corso dell'anno: è sensibilmente maggiore nei mesi invernali (in quanto è maggiore il fabbisogno per l'illuminazione) e ridotto nei mesi estivi (sia per il minore fabbisogno in termini di illuminazione, che per il minore utilizzo della scuola da parte dell'utenza). In fig.2 è riportato il consumo mese per mese di energia elettrica: è sensibile il calo nei mesi estivi e la ripresa nei mesi autunnali;
3. analizzando i consumi durante una settimana, abbiamo notato ovviamente una drastica riduzione nei week-end, rispetto ai giorni di scuola: in ogni caso però, la domenica, i consumi non sono stati nulli (a scuola non c'è nessuno!), a causa del fatto che viene comunque utilizzata dell'energia per l'illuminazione dell'edificio (che comunque causa un consumo di $80 \div 90 \text{ KWh}$, nei mesi estivi solo durante le ore notturne e nei mesi invernali anche nella fascia pomeridiana e nelle prime ore del mattino);
4. come ci si può attendere, l'analisi giornaliera dei consumi è rispondente al picco di utilizzo durante le ore mattutine e le prime ore del pomeriggio per le giornate di scuola effettiva. Ricordiamo che il martedì pomeriggio è stata deliberata la chiusura dell'edificio: è stato quindi notato un decremento dei consumi in questo giorno della settimana.

2.1 Dimensionamento dell'impianto

Abbiamo stimato che il fabbisogno annuale di energia elettrica per la scuola ammonta a 78.406 KWh quindi annualmente a $2,823 \cdot 10^{11} \text{ J}$. Se dividiamo questo valore per il numero di secondi presenti in un anno di 365 giorni, ossia $3,15 \cdot 10^7$, otteniamo la potenza che dovrebbe avere l'impianto per sopperire a questo fabbisogno:

$$P = \frac{2,823 \cdot 10^{11}}{3,15 \cdot 10^7} \simeq 9000 \text{ W}$$

Dal sito nextville ricaviamo che ogni KW di potenza richiede una superficie di circa 8 m^2 , quindi un impianto da 9 KW richiederebbe una superficie 72 m^2 , perfettamente installabile sul tetto dell'edificio scolastico (in particolare, nell'ala esposta a Sud).

Tuttavia questi valori si riferiscono a condizioni ideali di illuminamento, ossia incidenza normale dei raggi solari e cielo perfettamente limpido. Inoltre stiamo supponendo che le condizioni di illuminamento permangano per tutte le 24 ore: ipotizzando invece che le ore di luce in un anno, a Pieve di Soligo, siano mediamente 12 al giorno, risulta chiaro che i valori della metratura andrebbero esattamente raddoppiati, portando la superficie dell'impianto a 144 m^2 (oppure pensando di installare due impianti da 72 m^2 : questa soluzione, per quanto praticabile, visto che la superficie utile del tetto è di 480 m^2 , però implicherebbe maggiori costi di installazione, come si vedrà nei paragrafi seguenti).

3 Il simulatore solare

Le considerazioni ed i calcoli effettuati nella sezione precedente ipotizzano che l'impianto sia soggetto a condizioni ideali di illuminamento, ossia che per tutte le ore di luce:

- i raggi solari incidano sempre perpendicolarmente sulle celle fotovoltaiche;
- la radiazione solare non venga minimamente attenuata dall'atmosfera, ossia non sussista alcuna estinzione dell'intensità luminosa ad opera delle nubi (in altre parole, il cielo sia sempre perfettamente terso)

Queste condizioni sono, ovviamente del tutto irreali: in primo luogo il Sole, come sottolineato nell'introduzione, non ha un'altezza costante durante il suo moto apparente nel corso della giornata, ma, al contrario, sorgendo e tramontando, causa una variazione dell'angolo di incidenza dei raggi solari rispetto alla cella.

Se vogliamo simulare le reali condizioni di illuminamento, al fine di calcolare con esattezza l'energia effettivamente producibile dall'impianto, dobbiamo ricavare con precisione le seguenti informazioni:

1. come varia l'angolo α di inclinazione dei raggi solari rispetto alla normale alle celle nel corso della giornata e dell'anno;
2. in che modo, quantitativamente, le condizioni meteorologiche influiscono sulla radiazione solare, ossia, in altre parole, comprendere quali effetti sulla intensità della radiazione abbia la presenza di nubi o di altre condizioni avverse (problema dell'estinzione atmosferica).

In questa sezione ci occuperemo nello specifico del primo problema, ossia verrà determinata la dipendenza dall'istante di osservazione dell'angolo di incidenza, senza considerare, per il momento il problema dell'estinzione atmosferica: l'analisi di quest'ultimo fattore sarà effettuata da noi in un secondo momento.

3.1 L'angolo di inclinazione dei raggi solari

Chiamiamo $I_{incoming}$ l'energia che giunge sulla cella se il Sole fosse allo zenit. Questo valore, a meno dell'estinzione atmosferica, dipende da quello fornito dalla cosiddetta *costante solare*.

La *costante solare* $I_{\odot}$ è definita come energia radiante prodotta dal Sole per unità di tempo e per unità di superficie che arriva perpendicolarmente sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre. Questo valore è di:

$$I_{\odot} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Tuttavia, nel percorso dall'alta atmosfera a terra, la radiazione solare subisce fenomeni di attenuazione, assorbimento e diffusione. Si può ritenere, mediamente, che sulla superficie terrestre arrivi una quantità di energia pari a circa il 75% di $I_{\odot}$. Assumiamo quindi che:

$$I_{incoming} = 0,75 \cdot I_{\odot} \simeq 1000 \text{ W/m}^2$$

Ovviamente ciò si riferisce alla radiazione con incidenza perpendicolare. Se i raggi sono inclinati di un angolo α rispetto alla verticale, la quantità di energia $I_{current}$ che effettivamente può essere trasformata in fotocorrente è:

$$I_{current} = I_{incoming} \cdot \cos \alpha$$

La conoscenza dell'angolo di incidenza α è quindi un parametro fondamentale che dovremo determinare.

Ci accorgiamo subito che α è legato all'angolo h di altezza del Sole sull'orizzonte, un angolo che ovviamente dipende dall'istante t di osservazione (ora del giorno e giorno dell'anno). La dipendenza di h da t è determinata dal moto di rotazione e rivoluzione terrestre nonché dalla latitudine φ e longitudine λ del luogo di installazione dell'impianto.

Alla latitudine a cui si trova l'Istituto "Casagrande", ovviamente, il Sole non è mai allo zenit, ma avrà, durante il giorno e durante l'anno, un'altezza massima di culminazione compresa tra un valore minimo (assunto al solstizio invernale) e un valore massimo (assunto al solstizio estivo).

Si può dimostrare che l'altezza media h è pari alla co-latitudine del luogo: se ne deduce che se anziché considerare la cella perfettamente orizzontale si potesse inclinare di un angolo β detto *angolo di tilt* pari a $90 - \varphi$, si potrebbe massimizzare la radiazione incidente, poichè mediamente il Sole avrebbe durante l'anno la minima inclinazione rispetto alla normale alle celle: è per questo motivo che gli impianti fotovoltaici hanno le celle inclinate, nel Nord Italia, più o meno di 45° .

Resta da ottenere la relazione che lega l'altezza h del Sole sull'orizzonte all'angolo di inclinazione dei raggi sulla cella α . Esaminando la fig.4, notiamo che la relazione cercata è:

$$\alpha = 90 - (h + \beta) \tag{1}$$

Se ne deduce che se si potesse conoscere la dipendenza dall'istante di osservazione t dell'altezza sull'orizzonte del Sole, si potrebbe calcolare per ogni t la quantità di radiazione effettivamente incidente sulla cella, dalla formula:

$$I_{current}(t) = I_{incoming} \cdot \cos(90 - (h(t) + \beta)) \tag{2}$$

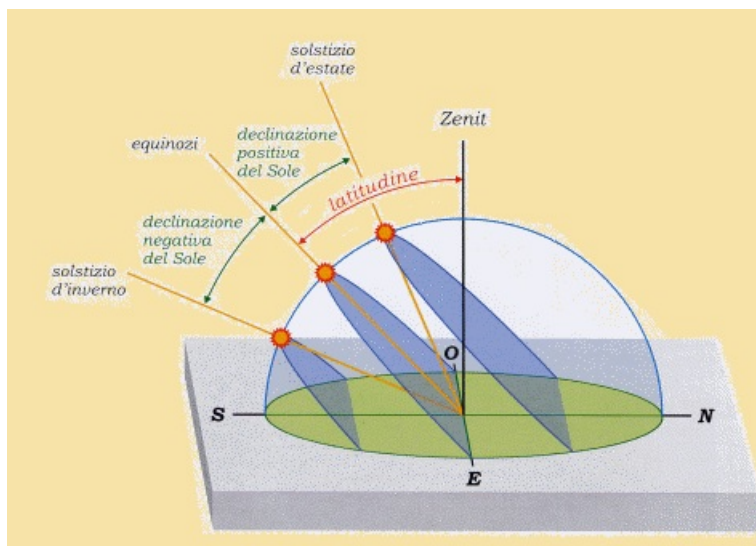


Figura 3: Relazione fra l'altezza media del Sole e la latitudine del luogo di osservazione (da il paese delle meridiane)

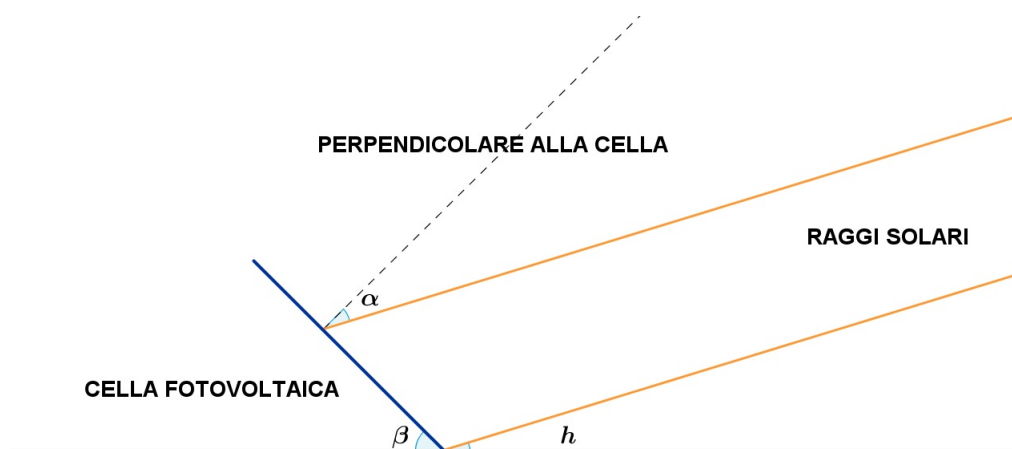


Figura 4: Relazione fra l'angolo di inclinazione sulla cella α , l'angolo di tilt β e l'altezza h

3.2 Studio della dipendenza di h da t

E' noto che a causa del moto di rotazione e rivoluzione terrestre, la posizione del Sole sulla volta celeste varia sia nel corso del giorno che in quello dell'anno. Se ne deduce che l'altezza h sull'orizzonte è una funzione di due variabili:

- una variabile che indicheremo con t , designante l'ora del giorno (con la convenzione di fissare $t = 0$ ore alla mezzanotte);
- una variabile che chiameremo n , indicante il giorno dell'anno (con la convenzione di fissare $n = 1$ il giorno 1 gennaio)

La relazione che useremo per calcolare l'altezza h è³:

$$h(t, n) = \arcsin(\cos \varphi \cdot \cos \delta(n) \cdot \cos H(t, n) + \sin \varphi \cdot \sin \delta(n)) \quad (3)$$

ove con φ indichiamo la latitudine del luogo di osservazione (in gradi decimali), δ_n designa la declinazione del Sole, H è il tempo solare apparente (in gradi decimali).

Mentre la latitudine del luogo è una costante, la declinazione del Sole e il tempo solare apparente dipendono sia da t che da n .

In particolare:

$$\delta(n) = 23,45 \cdot \sin \left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right) \quad (4)$$

Notiamo che il fattore 23.45 corrisponde all'obliquità dell'eclittica, convertita in gradi decimali. Si ha invece:

$$H(t, n) = 15 \cdot (AST - 12) \quad (5)$$

dove AST è il tempo solare apparente in ore decimali, che si calcola con la seguente formula

$$AST = LST + \frac{ET}{60} - \left(\frac{LSM - LON}{15} \right) \quad (6)$$

dove LST è il tempo solare locale espresso in ore decimali, LSM è il fuso orario italiano che corrisponde a 15°, mentre LON è la longitudine del luogo (Pieve di Soligo).

Infine, ET è l'equazione del tempo che si calcola con la formula:

$$ET(n) = 9,87 \cdot \sin \left[2 \cdot 360 \cdot \frac{(n - 81)}{366} \right] \cdot 7,67 \cdot \sin \left[360 \cdot \frac{n - 1}{366} \right] \quad (7)$$

Come si vede, detta ET dipende dal giorno dell'anno n .

3.3 Creazione del simulatore solare

Disponendo delle formule per calcolare l'altezza del Sole sull'orizzonte per ogni istante della giornata e per ogni giorno dell'anno, è possibile determinare l'energia totale incidente sulla cella ovviamente in condizioni di illuminamento ottimale (cioè senza tener conto dell'estinzione dovuta alle condizioni atmosferiche).

Per fare ciò stato costruito un software utilizzando le macro di Visual Basic disponibili in un foglio Excel, che prendendo in input i parametri del nostro impianto, ossia:

- latitudine dell'Istituto Casagrande: $\varphi = 45^\circ 54' 15,17'' = 45,90421389^\circ$, parametro dedotto da Google Earth;
- longitudine dell'Istituto Casagrande: $\lambda = LON = 12^\circ 9' 58,24'' = 12,16617778^\circ$, parametro anch'esso dedotto da Google Earth;
- angolo di tilt $\beta = 46^\circ$, determinato nel paragrafo precedente

calcola per ogni giorno n dell'anno e per ogni ora $t = LST$ del giorno l'altezza del sole $h(n, t)$

Calcolata l'altezza h , si deve risalire all'energia incidente sulla cella.

A tale scopo l'intervallo delle 24 ore è stato suddiviso in 1440 *steps* della durata di 60 secondi.

Tramite un ciclo *for* si è calcolata l'altezza del Sole in ciascuno di questi *steps*, risalendo tramite la formula 2 all'energia incidente.

Infine per avere l'energia totale incidente sulla cella durante l'arco delle 24 ore, si è proceduto ad effettuare la somma delle energie prodotte in ciascuno *step* di 60 secondi.

³Si veda il testo *Lezioni di Astronomia*, del prof. Cesare Barbieri, dispense del corso di Astronomia 1, Università degli Studi di Padova

L'espressione che calcola l'energia incidente è stata sottoposta ad un'istruzione condizionale che ha posto pari a zero questo valore qualora l'altezza del sole fosse negativa, di modo che fosse possibile tenere conto solamente delle ore effettive di luce durante la giornata (non è stato però tenuto conto della luce crepuscolare diffusa, ossia abbiamo considerato che quando l'altezza è $h \leq 0$, l'energia vale zero).

A questo punto si dispone dei dati relativi all'energia incidente in condizioni di illuminamento ideali giorno per giorno e della quantità totale incidente durante l'anno, che ammonta, secondo i nostri calcoli a circa:

$$E_{tot,Y} = 2 \cdot 10^{10} J/m^2 \simeq 5500 KWh/m^2$$

In realtà l'energia potrebbe essere lievemente superiore, tenendo conto anche della luce crepuscolare diffusa sia prima dell'alba che del tramonto (istanti nel giorno in cui l'altezza h del Sole vale zero): in ogni caso si può quantificare un incremento che è di molto inferiore all'1%.

4 Calcolo dell'energia effettivamente prodotta

Ovviamente questa quantità di energia deve essere trasformata in corrente elettrica, grazie al fenomeno dell'effetto fotoelettrico, che ha un rendimento, come sottolineato, non certo unitario.

I motivi per cui questo fenomeno non ha un rendimento unitario sono molteplici: da una parte abbiamo gli effetti dovuti al fatto che la luce contiene fotoni di tutte le lunghezze d'onda e fra queste solamente alcune permettono l'estrazione degli elettroni dagli atomi di silicio.

In particolare in sito università TN abbiamo trovato che, sul 100% dell'irraggiamento solare, le perdite ammontano al 55% per fotoni con lunghezze d'onda al di fuori della banda adatta al funzionamento del processo.

Dall'altra parte abbiamo le perdite dovute all'efficienza del trasferimento della corrente dalle celle all'impianto, agli effetti termici ed ai fenomeni di ricombinazione delle cariche che ammontano ad un altro 29%.

Infine un altro 3% è perso a causa dei fenomeni di riflessione della luce solare.

In definitiva, di $100 J$ che arrivano sulla cella, possiamo dire che solamente $13 J$ sono trasformati effettivamente in fotocorrente.

Questo dato è in accordo con i rendimenti medi delle celle in silicio policristallino reperibili sul *Web*. Nella tabella seguente abbiamo riportato alcuni rendimenti percentuali indicati da alcuni siti.

FONTE	RENDIMENTO
Enerpoint	12,5%
MCEnergie	13,0%
Università di Trento	13,0%
Energie rinnovabili AM	12,5%

Come si può osservare, il rendimento medio è appunto del 13%, che sarà quello assunto nel seguito della nostra trattazione.

Ciò comporta che l'energia effettivamente convertita in corrente elettrica annualmente sia di:

$$E = 2,6 \cdot 10^9 J/m^2 = 722 KWh/m^2$$

4.1 Stima dell'estinzione atmosferica

Come detto, il dato ricavato precedentemente non tiene conto dei fenomeni di attenuazione legati all'assorbimento della radiazione solare determinato dalle condizioni atmosferiche. In altre parole, l'energia che abbiamo calcolato è quella che si otterrebbe se il cielo fosse sempre perfettamente limpido.

Le condizioni atmosferiche ovviamente determinano una deviazione anche consistente da questa situazione, in quanto le nubi schermano la radiazione solare, causando il fenomeno dell'estinzione atmosferica. Ipotizziamo che per questo fenomeno valga una legge del tipo:

$$E_{effettiva} = a \cdot E_0$$

ove con E_0 è indicata l'energia raccolta nell'ipotesi di avere il cielo perfettamente limpido ed il coefficiente $0 \leq a \leq 1$ si riferisce alla percentuale di energia perduta per estinzione atmosferica.

Ovviamente il coefficiente a sarà differente a seconda della copertura del cielo, praticamente unitario in una giornata serena e quasi nullo nelle giornate piovose.

Una stima verosimile del valore di tali coefficienti si rivela a questo punto uno dei fattori più importanti per capire di quanta energia effettivamente si può disporre tenendo conto delle condizioni atmosferiche.

A questo punto abbiamo proceduto:

- alla compilazione di una tabella che per ogni giorno dell'anno riporti mediamente le condizioni atmosferiche nella zona di installazione dell'impianto. A questo scopo abbiamo reperito in rete delle tabelle inerenti le condizioni meteorologiche del comune di Refrontolo (confinante con Pieve di Soligo), riferentesi all'anno 2013. Dalla lettura di queste statistiche dette S abbiamo potuto conoscere giorno per giorno quali sono state le condizioni atmosferiche: sole, pioggia/neve/temporale, nebbia.
- alla stima verosimile dei coefficienti di estinzione relativi a ciascuna di queste condizioni.

Per quanto riguarda la stima dei coefficienti ne abbiamo tentato una misurazione diretta per mezzo di un luxometro digitale. E' stato confrontato il valore di lettura I (luminamento relativo ad una determinata condizione atmosferica del cielo) con quello dell'illuminamento tipico di $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$, deducendo il valore del parametro a da:

$$a = \frac{I}{I_0}$$

Tuttavia, le misure di a per le giornate serene sono risultate impossibili in quanto lo strumento da noi usato aveva un valore di fondo scala del tutto incompatibile. Solamente per i giorni di cielo coperto è stato possibile effettuare la misurazione, trovando dei coefficienti di estinzione a del tutto compatibili con quanto si legge nel seguito.

Abbiamo quindi dovuto tentare una stima autonoma, considerando attentamente le condizioni descritte nelle statistiche S , e facendo riferimento a dei valori tipici reperibili in rete, ad esempio nel portale Acca.

Il valore dei coefficienti a e che sono stati da noi utilizzati sono riportati nella tabella seguente:

CONDIZIONE	a
sole	1,00
pioggia	0,15
nebbia	0,80
pioggia e neve	0,02
pioggia e nebbia	0,02
pioggia, neve e nebbia	0,01
pioggia e temporale	0,20
temporale e nebbia	0,60
pioggia temporale e nebbia	0,45
temporale	0,60

Abbiamo adottato le seguenti convenzioni:

- SOLE= giornata di cielo terso, estinzione da parte di nubi praticamente assente per tutta la giornata

- PIOGGIA = cielo totalmente coperto per tutta la giornata in presenza o meno di precipitazioni
- NEBBIA = presenza di nebbia nella prima parte della giornata, ma cielo limpido nelle restanti ore (nelle ore iniziali della giornata il coefficiente può essere pari a quello del cielo coperto $a = 0,15$, ma il successivo diradamento della nebbia lo fa aumentare fino al valore $a = 1$, quindi mediamente ne deriva un coefficiente di $a = 0,80$)
- PIOGGIA E NEVE = precipitazioni nevose/pioverse per tutta la giornata
- PIOGGIA E NEBBIA = presenza di nebbia nella prima parte della giornata e cielo successivamente coperto per la restante parte del giorno, in presenza di precipitazioni
- PIOGGIA, NEVE e NEBBIA = come sopra ma con maggiore dispersione della radiazione
- PIOGGIA E TEMPORALE = cielo coperto per tutta la giornata, analogo alla situazione di PIOGGIA
- TEMPORALE e NEBBIA = analogo alla situazione di NEBBIA ma con maggiore dispersione della radiazione
- PIOGGIA, TEMPORALE E NEBBIA = come sopra, con un estinzione ancora maggiore
- TEMPORALE = situazione tipicamente estiva, con precipitazioni di breve durata che lasciano poi spazio a cielo generalmente sereno.

4.2 Energia prodotta

A questo punto possiamo disporre di una tabella in cui, giorno per giorno, possiamo leggere il valore dell'energia effettivamente prodotta dall'impianto, a seconda delle ore di luce e delle condizioni atmosferiche. Per calcolare l'energia prodotta annualmente basterà semplicemente sommare le quantità inerenti ciascuno dei 365 giorni. Ovviamente ciò si riferisce ad un anno caratterizzato dalle condizioni meteorologiche relative alle statistiche S , ma che si può prendere come riferimento generale.

Secondo i nostri calcoli, per metro quadro, l'energia realisticamente prodotta può ammontare a:

$$E_{tot} = 443,8323 \text{ KWh}/m^2$$

5 Calcolo dei costi e tempi di ammortamento

In questa sezione conclusiva dobbiamo cercare di rispondere alla domanda principale che ha guidato il nostro lavoro: che convenienza verosimilmente si può avere nell'installare un impianto nel nostro Istituto, ovvero che vantaggio economico si può pensare di avere, alla luce dei consumi elettrici e dell'energia che può essere prodotta dall'impianto?

Possiamo in linea di principio ipotizzare di produrre tutta l'energia di cui l'Istituto ha bisogno con il nostro impianto.

Se il fabbisogno ammonta annualmente a 78.406 KWh e la produzione realistica è, come visto, di circa $444 \text{ KWh}/m^2$, avremmo bisogno di una metratura di $176 m^2$. Usando quindi un impianto così dimensionato l'Istituto potrebbe essere in linea di principio indipendente e produrre quindi tutta la corrente elettrica di cui ha annualmente bisogno.

Tuttavia il fabbisogno energetico non è sempre lo stesso nè durante le ore di una singola giornata, nè durante le ore dell'anno, così come la produzione è soggetta alla stessa variabilità. Ne deriva che in certi periodi dell'anno o momenti della giornata il fabbisogno potrebbe superare la produzione.

Dobbiamo altresì considerare che il processo di generazione dell'energia elettrica dalla luce solare non dà la possibilità di un accumulo: in altre parole, l'energia prodotta deve essere istantaneamente consumata. Questa caratteristica degli impianti fotovoltaici, spesso misconosciuta, ci obbliga ad una soluzione che viene resa possibile dai gestori della rete elettrica: procedere ad una compravendita dell'energia, vendendo al gestore la quota di energia quando viene effettivamente prodotta e comprando dal gestore l'energia nei momenti in cui non viene prodotta. E' questo in sintesi il meccanismo del cosiddetto *scambio sul posto*.

Ovviamente questo processo è soggetto alle leggi del mercato per cui, a meno che il gestore non sia un ente benefico, i prezzi di acquisto dell'energia dal gestore sono sempre superiori ai prezzi di vendita.

Ne consegue quindi che per coprire il costo dell'energia acquistata dal gestore è necessario produrne in quantità maggiori, aumentando il dimensionamento in m^2 (ovviamente di un fattore pari al rapporto fra il costo dell'energia acquistata e quello dell'energia venduta!). Ciò ovviamente fa levitare i costi di installazione e quindi innesca un meccanismo per cui non risulta mai possibile essere totalmente indipendenti da un gestore dell'energia elettrica!

Per poter procedere con i nostri calcoli è quindi indispensabile documentarci sul rapporto fra il costo dell'energia acquistata dal gestore ed il prezzo che il gestore ci pagherebbe per l'energia da noi prodotta e ad esso venduta.

5.1 Prezzi dello *scambio sul posto*

Nel sito fotovoltaico Nord Italia possiamo avere un'idea di questa differenza di prezzi per l'energia acquistata e venduta. Malgrado le indicazioni alquanto nebulse si può riscontrare che esiste un rapporto di 1 a 3 fra energia venduta al gestore ed energia comprata dal gestore. Si può stimare allora che:

- la quantità di 1 KWh prodotto dall'impianto verrebbe venduta al gestore al prezzo di 0,068 €
- la quantità di 1 KWh acquistata dal gestore costerebbe all'Istituto 0,204 €

A questo punto, possiamo procedere ad un calcolo preliminare, per capire se esiste un utile economico oppure per quantificare l'eventuale risparmio.

Dai nostri calcoli risulta che:

- l'energia prodotta giornalmente, sommata sui 365 giorni, tenendo conto della reale produzione della cella ammonta a 444 KWh/m^2 , quindi il ricavo sarebbe di 30,18 €/m².
- Il fabbisogno energetico annuale (consumo nel 2014) abbiamo visto essere di 78.406 KWh , che implicherebbe una spesa di 15.994 €

Il pareggio si avrebbe se si potesse disporre, allora, di un impianto della superficie S pari a:

$$S = \frac{15.994}{30,18} = 530 m^2$$

Un impianto del genere sarebbe del tutto irrealizzabile, non solo per la metratura insufficiente del tetto dell'Istituto, ma anche per i costi di installazione, come esamineremo nel prossimo paragrafo.

Più realisticamente, considerando la metratura $S = 144 m^2$ che avevamo prospettato nei paragrafi iniziali, possiamo dire che il ricavo potrebbe ammontare a $144 \cdot 30,18 = 4346$ €. La spesa per il fabbisogno di energia elettrica quindi sarebbe ridotta a 11.648 €, con un risparmio del 27%.

Ovviamente questi calcoli sono al netto degli inevitabili costi di installazione, che verranno esaminati nel prossimo paragrafo.

5.2 Costo di installazione

Ovviamente, come sottolineato più volte, l'installazione di un impianto fotovoltaico implica un certo onere economico, che comprende il costo dei materiali, la manodopera per l'installazione, i collegamenti alla rete elettrica, le pratiche burocratiche ed anche l'installazione di un *inverter*, ossia di un dispositivo che trasforma la tensione continua prodotta dalle celle in tensione alternata, con cui è possibile far funzionare i dispositivi di una rete elettrica privata.

Il reperimento dei costi non è semplice: in rete esiste una letteratura nutritissima, visto sono numerose le ditte e le imprese che si occupano dell'installazione degli impianti in Italia. Queste ditte praticano dei prezzi molto diversi tra loro.

Dopo un'attenta ricerca abbiamo riportato in tabella 1 le informazioni riportate in alcuni siti. Abbiamo calcolato i costi al m^2 comprensivi di Iva e facenti riferimento ad impianti della potenza di 9 KW .

Costo in €/m ² [comprensivo di Iva al 10%]	FONTE
308	engisolar
264	Nord Italia
184	portaleSole
638	solarpanel
734	consulente energia
388	Solare Sicilia

Tabella 1: Costi al m² per impianti da 9 KW

Si può quindi dedurre che i costi medi finali al metro quadro ammontano a 420€. Per la metratura che abbiamo previsto si calcola quindi un costo complessivo di 60.480€. Ovviamente i costi sono più alti se si volessero installare due impianti da 70 m² (soluzione prospettata nel paragrafo iniziale), in quanto raddoppierebbero le spese per contatori, *inverter* e collegamenti.

5.3 Calcolo dei tempi di ammortamento

La spesa iniziale sarà quindi proporzionale alla metratura. Tuttavia dobbiamo considerare anche gli sgravi fiscali inerenti la legge 296/06 che permettono un rimborso del 55% sugli oneri sostenuti per interventi di riqualificazione energetica, inclusa l'installazione di impianti fotovoltaici. Secondo questa legge è possibile dedurre quindi il 55% delle spese di installazione, usufruendo di un rimborso decennale.

Annualmente quindi, dei 60.480€, sarebbero restituiti tramite bonus fiscali, 3326€ per dieci anni.

A questo punto abbiamo tutti gli elementi per il calcolo dei tempi di ammortamento, ossia del tempo necessario perchè l'investimento iniziale sia ripagato grazie alla riduzione della spesa sulla corrente elettrica.

Senza impianto, la relazione che lega la spesa y in euro al numero di anni x è:

$$y = 15.994 \cdot x$$

Con l'impianto, la relazione è invece differente: annualmente, per i primi dieci anni, il costo è, oltre alla spesa iniziale, $15.994 - 4.346 - 3.326 = 8.322$ €, quindi:

$$y = 60.480 + 8.322 \cdot x$$

Il punto di pareggio x_p si avrà quindi per:

$$x_p = \frac{60.480}{7.672} = 7,88$$

In definitiva, la spesa dell'impianto viene ammortizzata in 8 anni scarsi. Per tempi successivi a x_p ed inferiori a 10 anni, l'impianto consente di ottenere un risparmio effettivo sulla spesa per l'energia elettrica di 8.322€ annui, pari a più del 50% del costo della bolletta! Dal decimo anno, gli incentivi statali non ci sono più, quindi il risparmio cala a 4.346€ annui, pari al 27% del costo della bolletta.

La funzione che consente di calcolare la spesa annua per tempi successivi ai 10 anni sarà:

$$y_{>10} = 27.220 + 11.648 \cdot x$$

L'andamento delle due funzioni è rappresentato in fig.5.

Bisogna però ribadire che queste proiezioni sono verosimili solamente se si ipotizza che la produzione dell'impianto sia la stessa tutti gli anni, così come il fabbisogno energetico. In realtà si tratta di due parametri fortemente variabili, principalmente a causa delle condizioni atmosferiche (che fanno cambiare sensibilmente la produzione energetica di anno in anno) e del diverso fabbisogno, anche questo variabile annualmente.

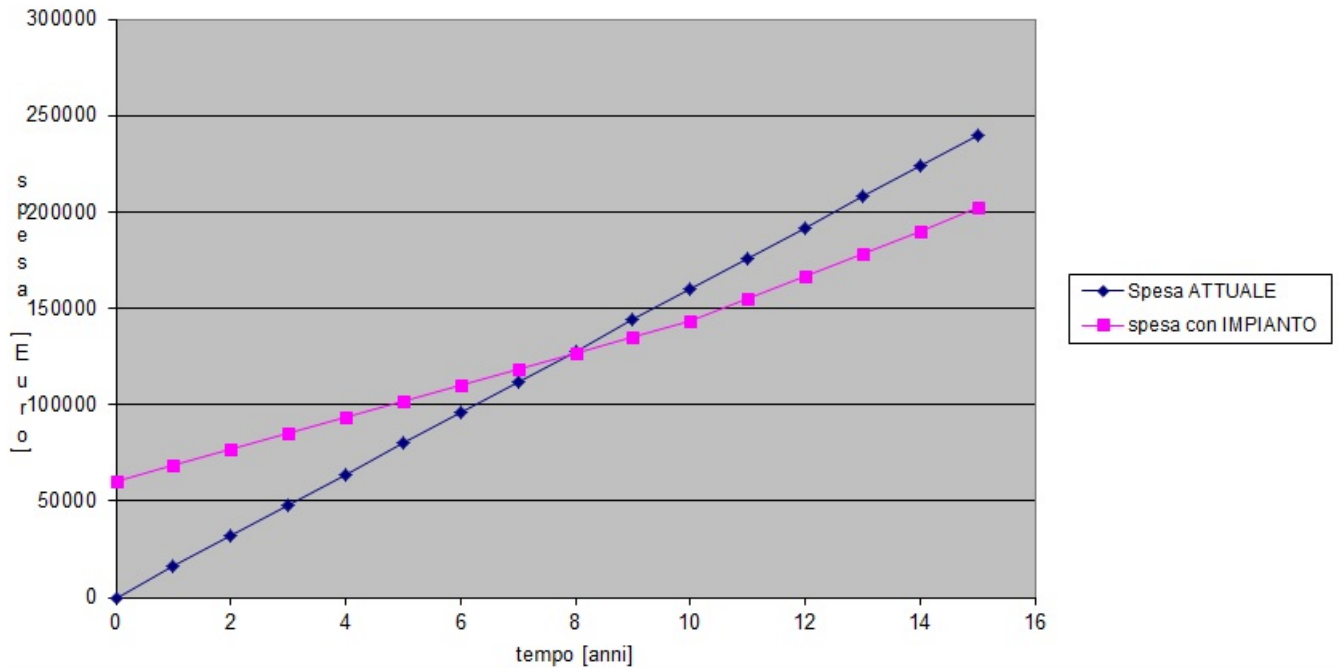


Figura 5: Rappresentazione dell'andamento della spesa per l'energia elettrica per l'Istituto senza l'impianto (curva blu) e con l'impianto (curva rosa), sia prima che dopo i 10 anni: notare il punto di pareggio, intersezione delle due rette.

In ogni caso, la situazione reale non si discosta dalla nostra previsione: stimiamo che in ogni caso il tempo di ammortamento x_p sia compreso in un intervallo che va da un minimo di 7 anni ad un massimo di 8 e che in ogni caso la percentuale di risparmio, superati i dieci anni di incentivi statali sia in ogni caso attorno al 30% annuo.

6 Conclusioni

Il nostro lavoro ha messo in evidenza le enormi difficoltà insite nello studio dell'efficienza energetica ed economica di un impianto fotovoltaico per il nostro Istituto: sono moltissimi i parametri che si devono considerare, come visto nei paragrafi precedenti. Inoltre non è possibile fare delle previsioni esatte né sui reali fabbisogni, né sulla reale produzione energetica, visto che quest'ultima è fortemente legata alle condizioni di illuminamento del cielo e quindi dell'estinzione atmosferica. E' stato visto, comunque, che una volta superati i tempi di ammortamento e terminati gli incentivi statali, l'installazione dell'impianto consente di risparmiare sul costo dell'energia ben il 30%, percentuale che diviene significativa su una spesa superiore ai 15.000€, come visto. Ciò fa propendere caldamente per questo investimento, in una struttura con un tale fabbisogno e disponendo di una metratura di almeno $100 m^2$.

In fig.6 sono riportati i dati definitivi inerenti l'impianto fotovoltaico.

STIMA DELLA PRODUZIONE ENERGETICA E DEL GUADAGNO ECONOMICO IMPIANTO FOTOVOLTAICO "ARCHIMEDE" I.S.I.S.S. "MARCO CASAGRANDE" PIEVE DI SOLIGO (TV)										
DATI DELL'IMPIANTO					COSTO					
UBICAZIONE	lat	45,90421	RENDIMENTO CELLA	0,13	silicio policristallino	Installazione		costo per Kwh comprato dall'ENEL		0,204
	long	12,16618	METRATURA	144		60480 euro		ricavo per Kwh venduto all'ENEL		0,068
	TILT	46				netti	27216			
					TEMPO AMM	7,882795	ANNI			
PRODUZIONE [2014]	63911,85 KWh	RICAVO	4346,006 Euro							
FABBISOGNO [2014]	78406 KWh	SPESA	15994,82 Euro	GUADAGNO						27,17133 %

Figura 6: Riassunto dei parametri del nostro impianto fotovoltaico

7 Appendice

LISTATO DELLA MACRO usata per il simulatore solare (l'implementazione in Visual Basic è opera di Luigi Maninchedda e Leonardo Rebeschini, la realizzazione della macro incorporata in un foglio Excel è del Prof. Zampieri).

```

Sub prova2()
Dim giorno, i As Integer
Dim lambda, phi, ora, B, ET, AST, delta, H, altezza, energia, tilt As Double
lambda = 12.16617778
phi = 45.90421389
tilt = Range("H1")
For giorno = 1 To 365
B = 6.28 * (giorno - 81) / 364
ET = 9.87 * Sin(2 * B) - 7.53 * Cos(B) - 1.5 * Sin(B)
delta = 23.45 * Sin(6.28 * (284 + giorno) / 365)
For i = 0 To 1440
ora = i / 60
AST = ora + ET / 60 - (15 - lambda) / 15
H = 15 * (AST - 12)
altezza = Cos(phi * 3.14 / 180) * Cos(delta * 3.14 / 180) * Cos(H * 3.14 / 180)
+ Sin(phi * 3.14 / 180) * Sin(delta * 3.14 / 180)
altezza = Atn(altezza / Sqr(-altezza * altezza + 1))
altezza = altezza * 180 / 3.14
energia = 1000 * Cos(Abs((altezza + tilt) - 90) * 3.14 / 180) * 60
If energia > 0 Then
Sum = Sum + energia
Else
energia = 0
End If
Next i
Range("A" & giorno) = giorno, Range("B" & giorno) = Sum
Sum = 0
Next giorno
End Sub

```