

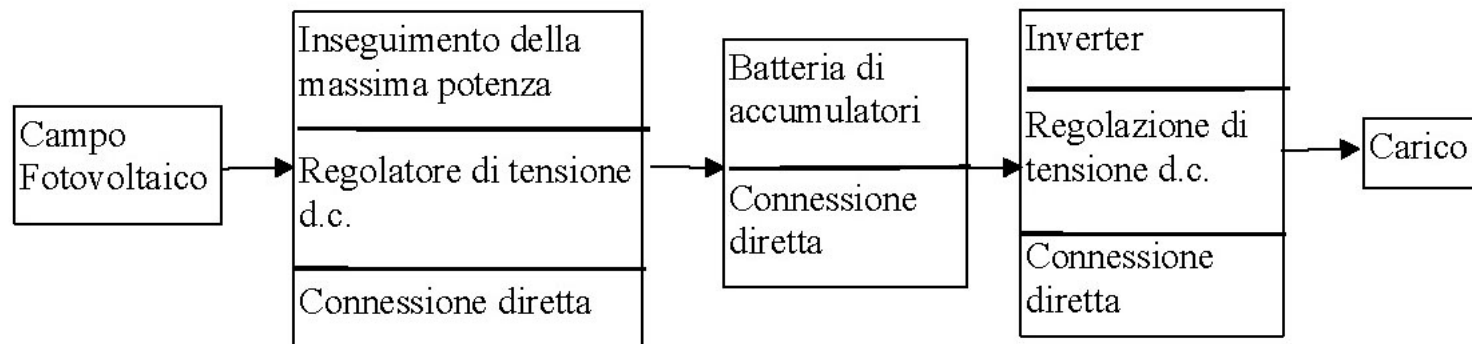
I SISTEMI CONNESSI IN RETE

Indice argomenti trattati nella lezione

- Configurazione impianti fotovoltaici
- Produzione energetica media annua di un pannello fotovoltaico;
- Fabbisogno energetico di unità abitativa di circa 80mq;
- Dimensionamento pannelli fotovoltaici;
- Esempio di progetto di un impianto fotovoltaico allacciato alla rete di distribuzione.

Configurazione impianti fotovoltaici

Schema generale di un impianto fotovoltaico. In ogni blocco sono indicate le alternative possibili.

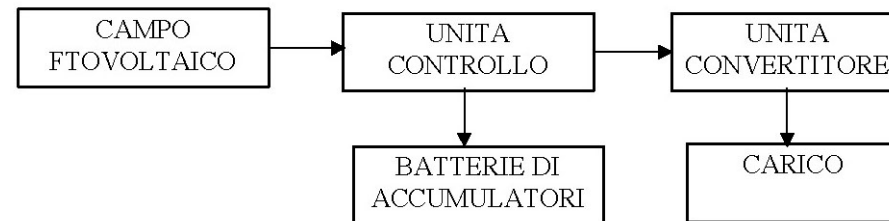


Possiamo individuare due diverse classi di impianti fotovoltaici:

- impianti connessi alla rete (grid connected);
- impianto in isola (stand alone).

IMPIANTI ISOLATI (STAND ALONE)

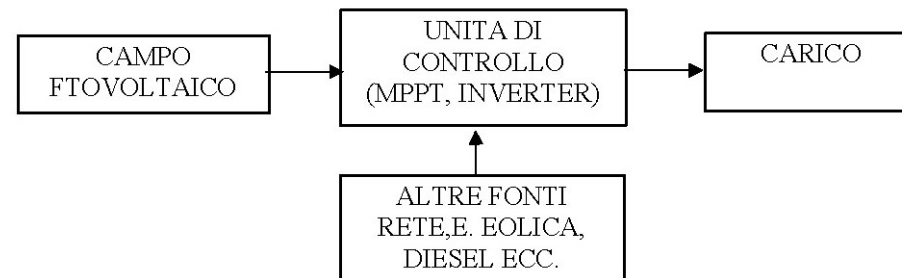
- Impianti isolati (Stand Alone) – con accumulo e senza integrazione secondaria



Data la caratteristica di discontinuità della radiazione solare, è necessario introdurre un accumulo, dimensionato per intervenire per il periodo di mancanza di insolazione. Impianto fotovoltaico dimensionato per erogare più energia del fabbisogno giornaliero più la quota destinata alla carica dell'accumulatore

IMPIANTI ISOLATI (STAND ALONE)

- Impianti isolati (Stand Alone) – con accumulo e con integrazione secondaria



Il sistema è alimentato da un generatore ausiliario. Possibilità di integrare l'impianto con altra fonte di energia elettrica. Se viene utilizzato un generatore Diesel è essenziale minimizzare il consumo di combustibile.

Idoneità del Sito

Sopralluogo

Obbiettivi:

- Individuare possibili soluzioni nella localizzazione dei pannelli (preferibilmente, direzione sud);
- Individuare locali tecnici (Q.E., batterie, etc.)
- Vincoli ambientali;
- Presenza di ostacoli

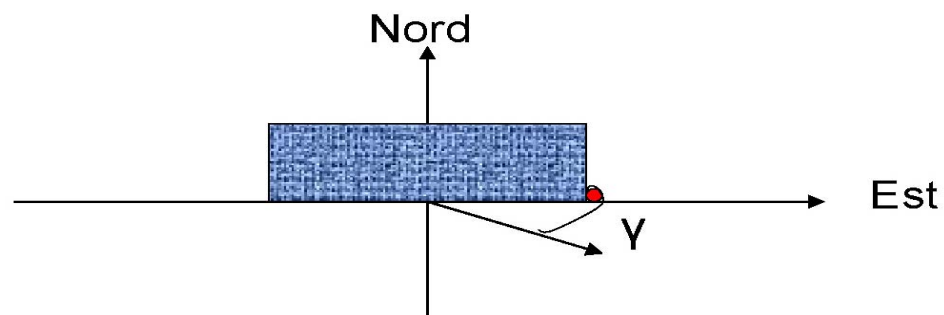
Strumenti:

- Bussola;
- Clinometro;
- Diagramma solare;
- Modulo sopralluogo;
- Macchina fotografica;
- Bindella metrica

Produzione Energetica Media Annua Pannello Fotovoltaico

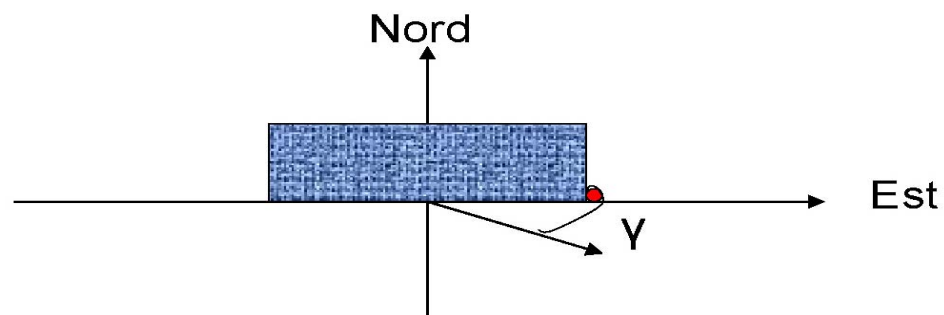
Con lo scopo di dare un parametro medio per il dimensionamento preliminare dell'impianto fotovoltaico, nelle seguenti tabelle verranno indicate le produttività medie annue su una superficie unitaria (kWh/mq) di pannelli in silicio policristallino in funzione della loro inclinazione rispetto al piano orizzontale (α) e dell'azimuth (γ)

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



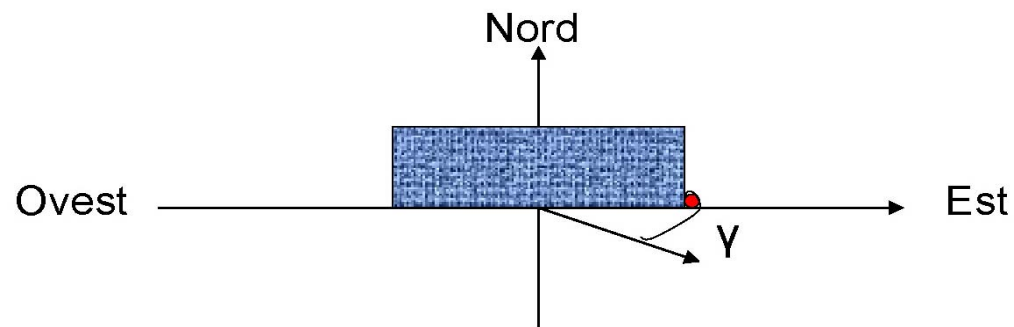
Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
130	0° (orizzontale)	0° (sud)
139	10°	0° (sud)
145	20°	0° (sud)
147	30°	0° (sud)
146	40°	0° (sud)

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



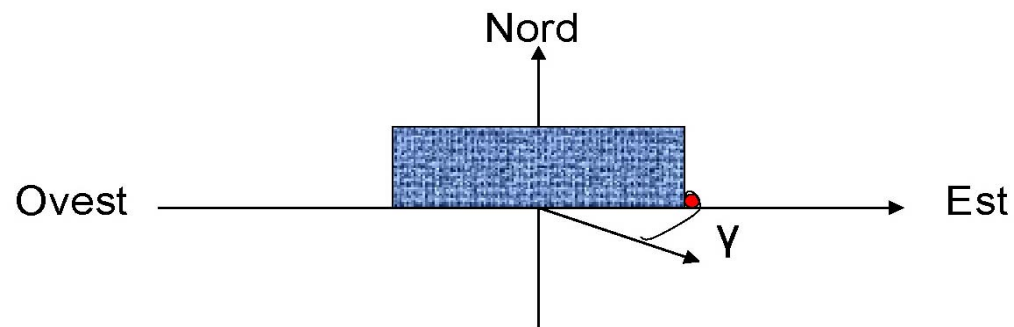
Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
130	0° (orizzontale)	-30° (sud est)
138	10°	-30°
143	20°	-30°
144	30°	-30°

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



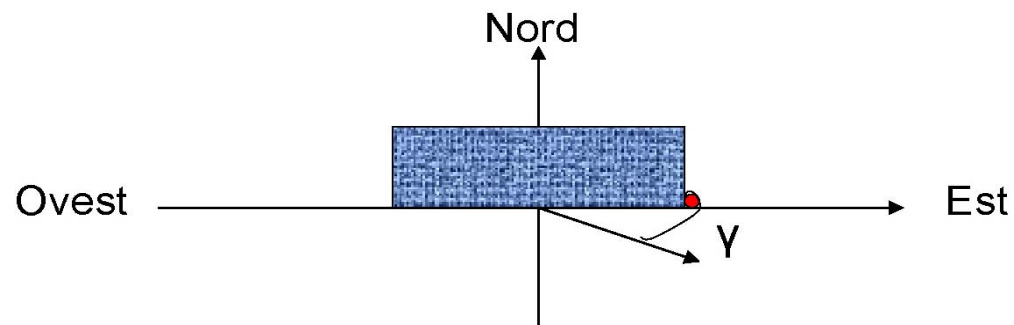
Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
130	0° (orizzontale)	30° (sud ovest)
138	10°	30° (sud)
143	20°	30° (sud)
144	30°	30° (sud)

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



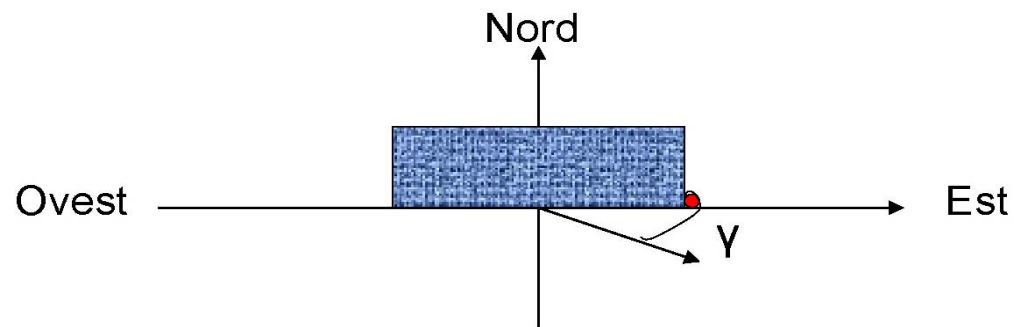
Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
136	10°	45° (sud ovest)
139	20°	45°
140	30°	45°

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



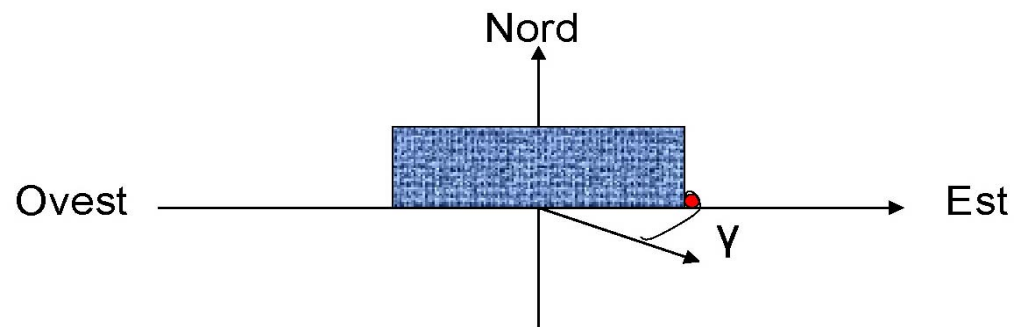
Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
136	10°	- 45° (sud est)
139	20°	- 45°
140	30°	- 45°

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
128	10°	- 90° (sud est)
125	20°	- 90°
121	30°	- 90°

Sistema empirico di calcolo dell'energia prodotta da un pannello di silicio policristallino



Energia Annua (kWh/mq)	Orizzontale (α)	Azimuth (γ)
128	10°	90° (sud ovest)
125	20°	90°
121	30°	90°

Stima del Consumo Energetico di un'abitazione

Nelle seguenti tabelle sono indicati i consumi energetici giornalieri stimati per un'unità abitativa di circa 80mq nel periodo estivo e nel periodo invernale

**STIMA DEI CONSUMI DI UN'UNITA' ABITATIVA DI CIRCA 80mq –
PERIODO ESTIVO**

Descrizione	Potenza (W) [A]	Ore/gg Utilizzo [B]	Fattore Cont. [C]	Consumo (Wh/g) [D]
Freezer e frigorifero	60	24	1	1440
Condizionatore	120	6	1	720
Illuminazione	120	5	0,5	300
Lavatrice	750	1	1	750
Lavastoviglie	660	1,5	1	990
TV	90	7	1	630
Impianto HiFi	120	1	1	120
Computer (Monitor + Desktop)	120	3	1	360
Ferro da stiro	260	1,5	1	390
Forno elettrico e forno microonde	570	1	1	570
Ec_e TOTALE (energia giornaliera)				6270

**STIMA DEI CONSUMI DI UN'UNITA' ABITATIVA DI CIRCA
80mq – PERIODO INVERNALE**

Descrizione	Potenza (W) [A]	Ore/gg Utilizzo [B]	Fattore Cont. [C]	Consumo (Wh/g) [D]
Freezer e frigorifero	60	24	1	1440
Illuminazione	120	8	0,6	580
Lavatrice	750	1	1	750
Lavastoviglie	660	1,5	1	990
TV	90	7	1	630
Impianto HiFi	120	1	1	120
Computer (Monitor + Desktop)	120	3	1	360
Ferro da stiro	260	1,5	1	390
Forno elettrico e forno microonde	570	1	1	570
Ec_i TOTALE (energia giornaliera)				5830

Stima del fabbisogno energetico annuale dell'unità abitativa

E_c = energia media consumata in un anno

$$E_c = E_{ci} * 150\text{gg} + E_{ce} * 215\text{gg}$$

Nel nostro esempio:

$$E_c = 5,83 \text{ kWh/gg} * 150\text{gg} + 6,27 \text{ kWh/gg} * 215\text{gg}$$

↓
= 2222 kWh/anno

(Parametro di riferimento nel dimensionamento di un'unità abitativa è pari a: 30 kWh/mq)

Problema

Aleatorietà della fonte solare e
quindi dell'energia prodotta

Disequazione Energetica

$$\sum_{i=1}^{30} E_{gi} \geq \sum_{i=1}^{30} E_{ci}$$

E_{gi} : energia giornaliera prodotta dal generatore fotovoltaico

E_{ci} : energia giornaliera richiesta dal carico elettrico

Energia Prodotta

$$E_{gi} = \eta_g \cdot A_g \cdot G_{mi} \cdot K$$

E_{gi} = Energia giornaliera prodotta dal sistema fotovoltaico

η_g = rendimento di conversione del sistema fotovoltaico

A_g = superficie del piano dei moduli

G_{mi} = radiazione globale media giornaliera
incidente sul piano dei moduli

K = coefficiente di riduzione dovuto ad
ombreggiamento

Rendimento Complessivo Sistema Fotovoltaico

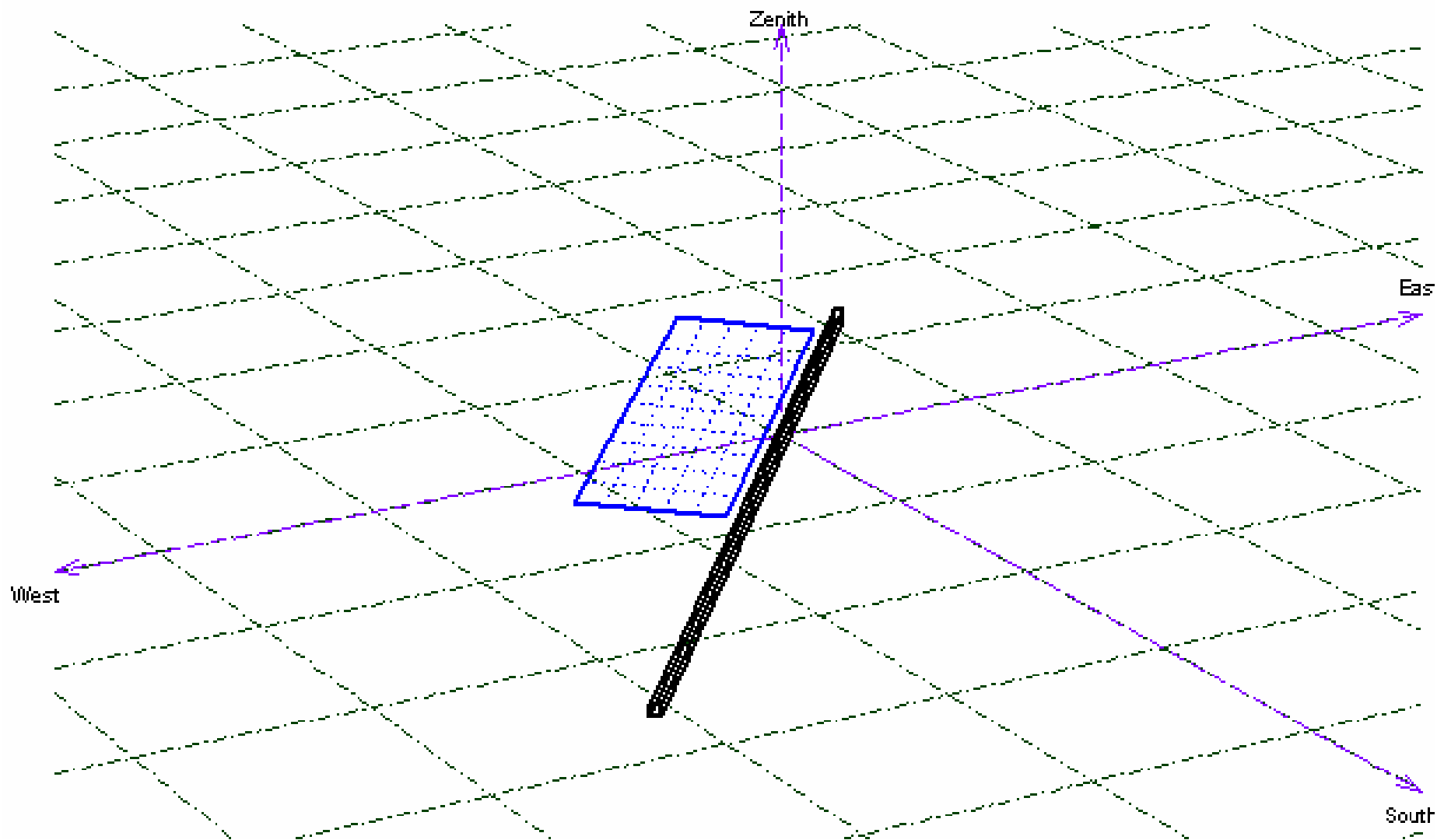
$$\eta_g = \frac{E_g}{E_p}$$

Energia prodotta dall'impianto fotovoltaico
Energia solare incidente sui pannelli inclinati

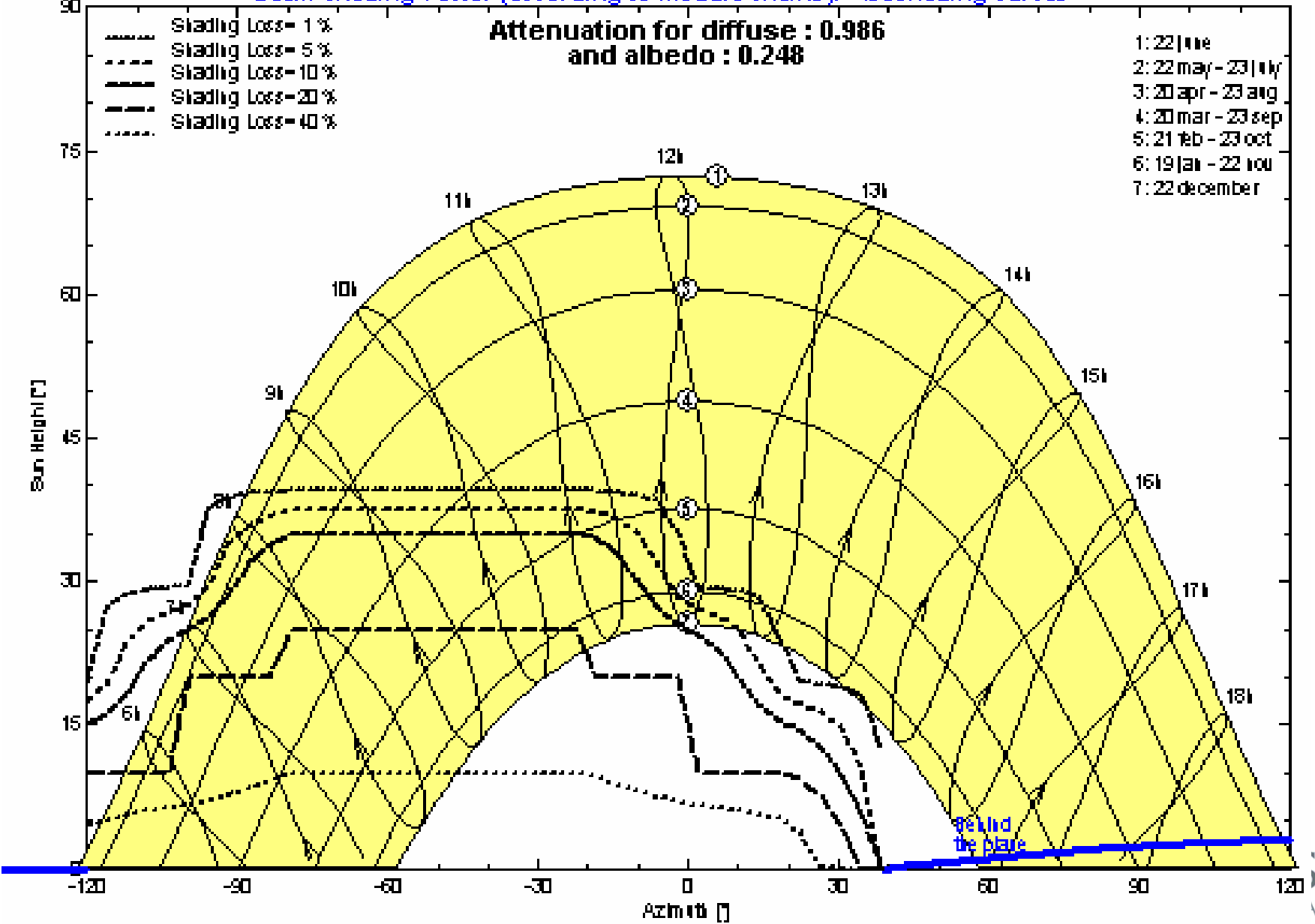
$$\eta_g = \eta_{\text{mod}} \cdot \eta_{\text{bos}}$$

$$\eta_{\text{mod}} = \text{Rendimento pannelli fotovoltaici}$$

$$\eta_{\text{bos}} = \text{Rendimento impianto elettrico a valle}$$



Beam Shading Factor (according to module chains): Isoshading curves



Rendimento Impianto Elettrico e Sistema di conversione

$$\eta_{bos}$$

Tipo di perdita	Rendimento associato
Scostamento della temperatura e dei moduli dalle condizioni STC	0,92 – 1,00
Mismatch fra i moduli e fra le stringhe	0,90 – 0,99
Accoppiamento tra generatore fotovoltaico e accumulo	0,85 – 0,95
Circuiti in corrente continua	0,98 – 0,99
Processo di carica / scarica dell'accumulo	0,70 – 0,95
Inverter	0,88 – 0,92
Circuiti in corrente alternata	0,96 – 0,98
Per impianti corrente continua	0,54 – 0,88
Per impianti corrente alternata	0,45 – 0,80

Determinazione Semplificata del coefficiente di riduzione dovuto ad ombreggiamento K

Curva, mese di giugno

- Dalle ore 6 alle ore 7 DT=1h K=15%
- dalle ore 7 alle ore 8 DT=1h K=7,5%
- dalle ore 8 alle ore 9 DT=1h K=0,3%
- dalle ore 9 alle ore 18 DT=8h K=0%

$$OreUtili = 8h + 2 \cdot (1 - 0,03) + 1 \cdot (1 - 0,075) + 1 \cdot (1 - 0,15)$$

$$OreUtili = 11,715$$

$$K = 1 - \frac{11,715h}{12h} = 0,024 = 2,4\%$$

Rendimenti Conversione moduli fotovoltaici

$$\eta_{\text{mod}}$$

Silicio monocristallino	13%
Silicio policristallino	11%
Silicio amorfo	6,5%

Superficie Minima del Generatore

Si determina imponendo che l'energia prodotta dal generatore (E_g) sia pari all'energia assorbita dal carico (E_c)

$$A_{g \min} = \frac{E_c}{\eta_g \cdot G_m \cdot K} \quad [\text{m}^2]$$

Potenza di Picco del Generatore

$$P_g = A_{g \min} \cdot D_{\text{mod}}$$

Dove:

D_{mod} = Densità di potenza generata dal modulo fotovoltaico

Tipici valori di Dmod [W/m2]	
Silicio monocristallino	130
Silicio policristallino	115
Silicio amorfo	65

Dimensionamento Pannelli

- S_p = superficie massima pannelli ftv
- E_c = energia annua assorbita dall'abitazione
- U_p = energia annua prodotta da n.1 mq di pannelli ftv dipende dalla tipologia del pannello, dalla sua inclinazione e orientazione rispetto al Sud

$$\mathbf{S_p = E_c / U_p}$$

Nel caso proposto si suppone di avere la falda di una abitazione diretta a sud ed un tetto inclinato di 30° sul quale appoggeremo i pannelli (impianto parzialmente integrato).

$$E_c = 2222 \text{ kWh/anno}$$

$$U_p = 147 \text{ kWh/anno}$$



$$S_p = 15 \text{ mq}$$

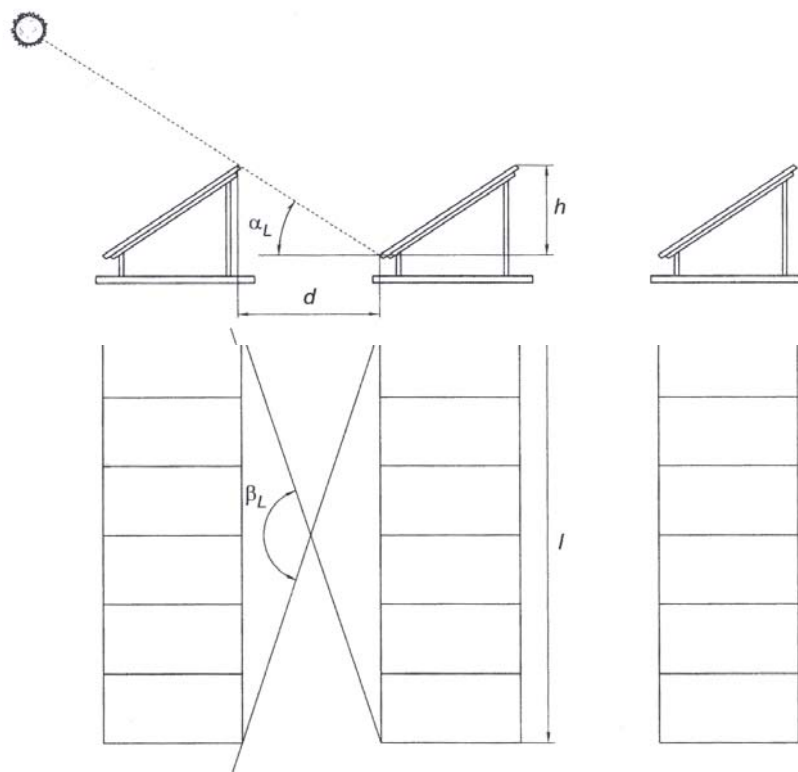
Potenza nominale impianto = $15(\text{mq}) * 135(\text{W/mq}) = 2025 \text{ W}$
dove 135W/mq è potenza media prodotta da un metro
quadro di pannello policristallino

OMBREGGIAMENTO DEL PIANO DEI MODULI DISPOSTI SU PIU' FILE – pag. 1

Ipotizziamo un campo fotovoltaico costituito da tre file parallele di pannelli. ogni fila avrà lunghezza l e sarà esposta verso sud

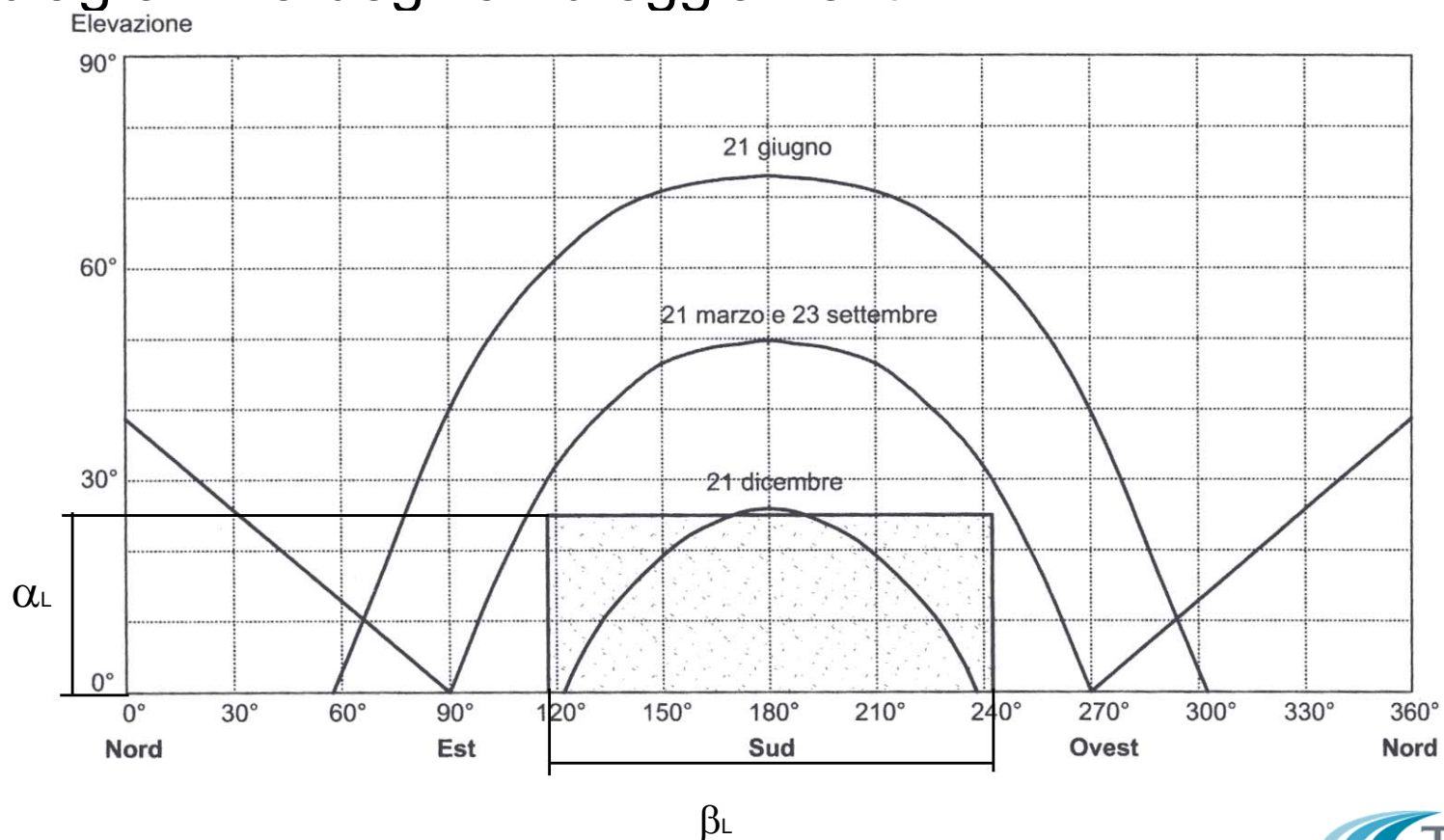
$$\alpha_L = \text{arctg} (h/d)$$

$$\beta_L = 2 \text{ arctg} (l/d)$$



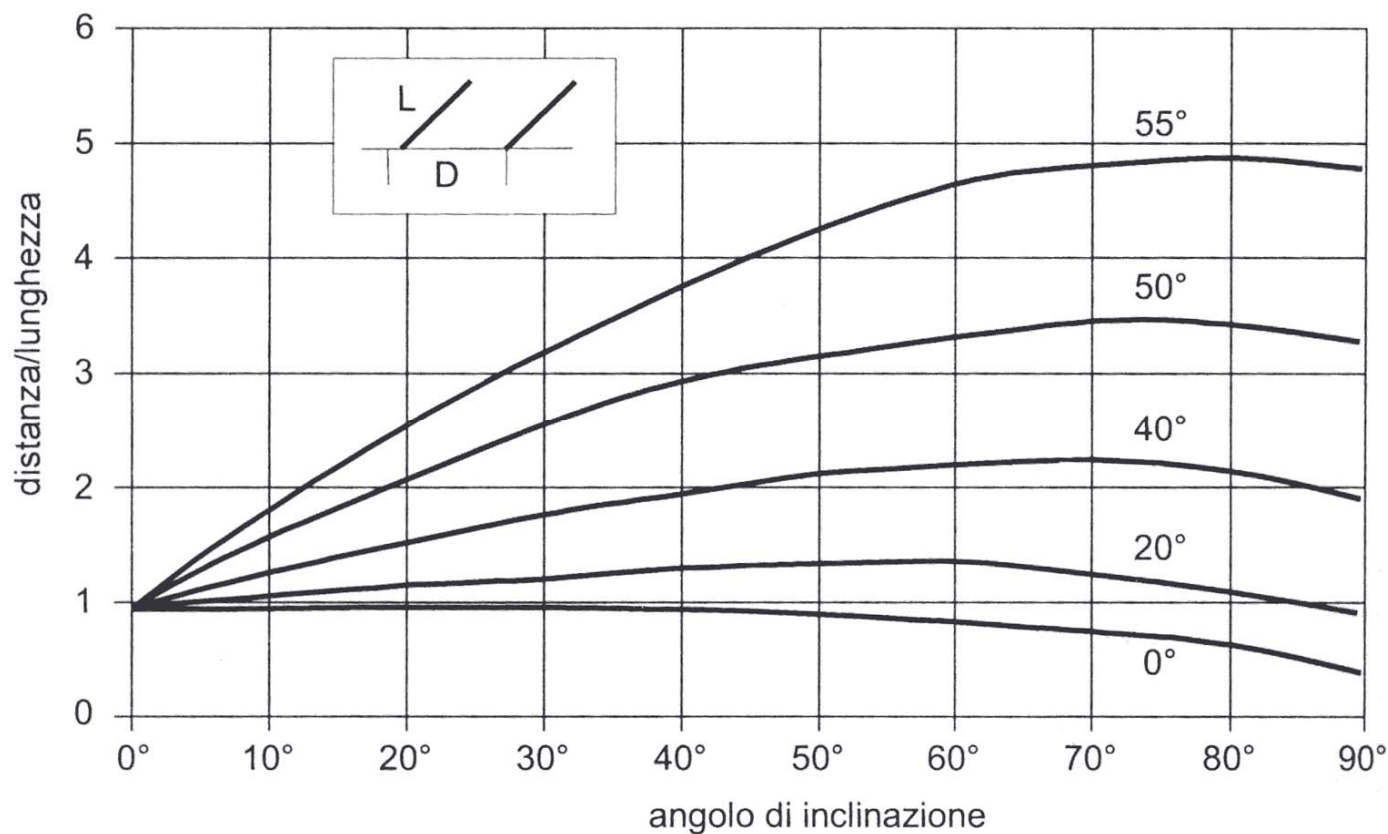
OMBREGGIAMENTO DEL PIANO DEI MODULI DISPOSTI SU PIU' FILE – pag. 2

Effetto dell'ombreggiamento tra stringhe di pannelli riportato nel diagramma degli ombreggiamenti



OMBREGGIAMENTO DEL PIANO DEI MODULI DISPOSTI SU PIU' FILE – pag. 3

Distanza minima D tra stringhe parallele di lunghezza L alle ore 12 del solstizio di inverno (21 dicembre) per diverse latitudini



OMBREGGIAMENTO DEL PIANO DEI MODULI DISPOSTI SU PIU' FILE – pag. 4

CONCLUSIONE:

L'ombreggiamento anche parziale di una fila di moduli può portare a sensibili perdite di potenza dell'impianto.

A scopo indicativo per ridurre l'ombreggiamento tra le stringhe parallele si può considerare:

$$D > 1,5h$$

CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI - pag. 1

Richiamiamo ora i principali sistemi elettrici utilizzati per gli impianti fotovoltaici.

Per **sistema elettrico** si intende la “*parte di un impianto elettrico costituito dal complesso dei componenti elettrici aventi una determinata tensione nominale*” (Norma CEI 64-8/2).

Gli impianti fotovoltaici appartengono ai sistemi di categoria 0 (fino a 50Vca e 120Vcc) o a quelli di I categoria (fino a 1000Vca e 1500Vcc).

Per quanto attiene alle possibili modalità di collegamento a terra la Norma CEI 64-8/3 prevede tre sistemi fondamentali: TN, TT, IT.

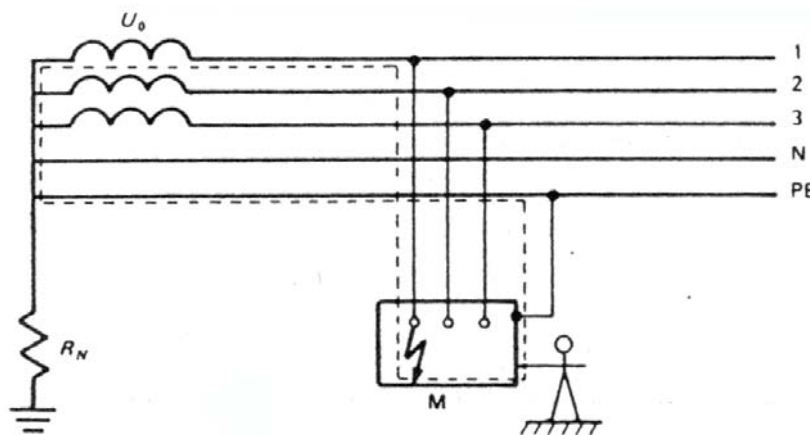
CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.2

Analizziamo il sistema TN

I sistemi TN hanno un punto collegato direttamente a terra mentre le masse dell'impianto sono collegate a quel punto per mezzo di un conduttore di protezione. A loro volta i sistemi TN si dividono in:

- 1)TN-S (conduttori di neutro e PE sono separati);
- 2)TN-C (conduttore di neutro e PE coincidono);
- 3)TN-C-S (sistemi che al loro interno presentano parti di tipo TN-S e TN-C).

Il sistema TN-S può essere così rappresentato:



Viene rappresentato il percorso della corrente di guasto nel caso di cedimento dell'isolamento di un apparecchiatura. Si osserva che l'anello di guasto è costituito da elementi metallici, ne consegue l'importanza dei dispositivi di protezione. In caso di guasto in qualsiasi punto dell'impianto, deve sempre essere soddisfatta la relazione: $Z_s * I_a \leq U_0$

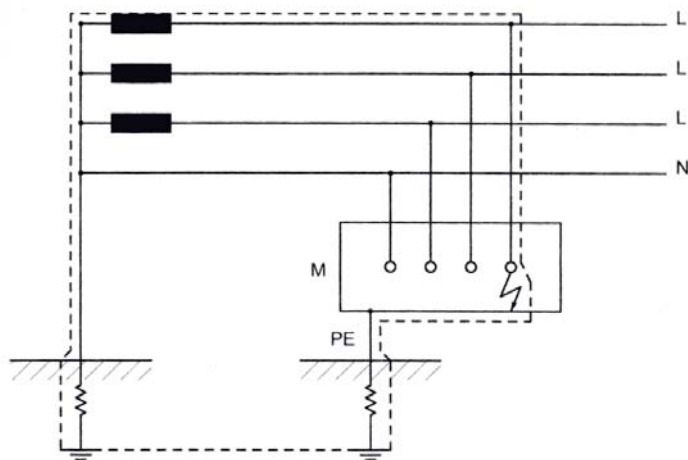
Dove Z_s rappresenta l'impedenza dell'anello di guasto, I_a è la corrente che provoca l'apertura del dispositivo automatico di protezione e U_0 è la tensione nominale in alternata tra fase e terra

CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.3

Analizziamo il sistema TT

I sistemi TT hanno un punto collegato direttamente a terra, mentre le masse dell'impianto risultano collegate ad un impianto di terra indipendente dal collegamento di terra presente sul lato alimentazione.

Il sistema TT può essere così rappresentato:



Viene rappresentato il percorso della corrente di guasto nel caso di cedimento dell'isolamento di un apparecchiatura. Si osserva che l'anello di guasto è costituito **non** è costituito esclusivamente da elementi metallici, ma comprende anche la terra nel suo percorso. Per ottenere un efficace protezione contro i contatti indiretti deve essere soddisfatta la relazione:

$$R_A * I_A \leq 50$$

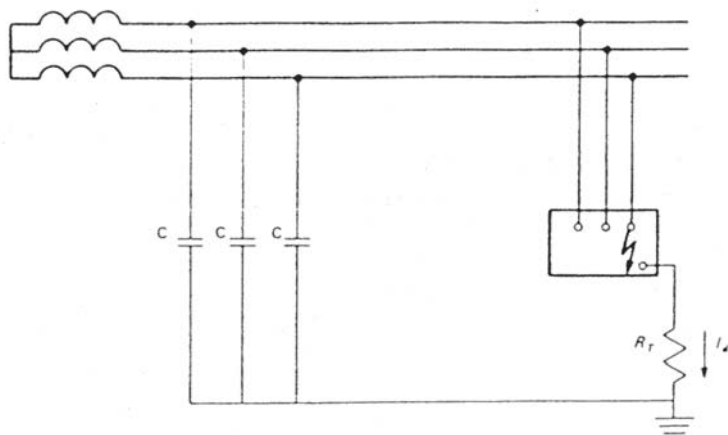
Dove R_A rappresenta la somma della resistenza del dispersore e dei conduttori di protezione mentre I_A la corrente che provoca il funzionamento automatico del dispositivo di protezione.

CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.4

Analizziamo il sistema IT

I sistemi IT hanno tutte le parti attive isolate da terra, mentre le masse dell'impianto risultano collegate a terra collettivamente o separatamente.

Il sistema IT può essere così rappresentato:



Viene rappresentato il percorso della corrente di guasto nel caso di un primo cedimento dell'isolamento di un apparecchiatura. Si osserva l'impedenza dell'anello di guasto è elevata (capacità verso terra dei conduttori). In questo caso non si ha interruzione del servizio. La corrente di guasto assume valori significativi solo in condizione di secondo guasto a terra. Per ottenere un efficace protezione contro i contatti indiretti deve essere soddisfatta la relazione: **$R_T * I_d \leq 50$**

Dove R_T rappresenta la resistenza del dispersore dispersore mentre I_d è la corrente di primo guasto. La norma CEI 64-8/4 prescrive che l'impianto debba disporre di un dispositivo di controllo dell'isolamento per indicare il manifestarsi di un primo guasto tra una parte attiva e una massa. Tale dispositivo azionerà un allarme sonoro e/o visivo.

CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.5

Schemi elettrici utilizzati per gli impianti fotovoltaici

Il lato in corrente continua di un impianto fotovoltaico può essere assimilato ad uno dei seguenti sistemi elettrici:

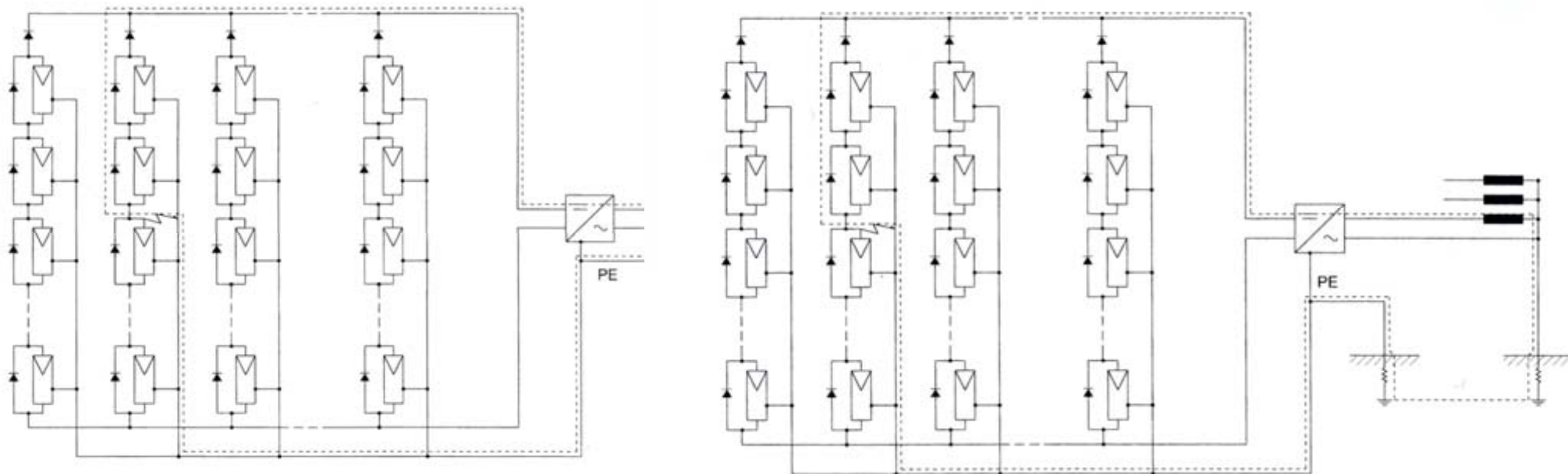
- Sistema TN o TT se l'inverter non è in grado di garantire la separazione galvanica tra la sezione in continua e quella in alternata;
- Sistema IT se l'inverter è equipaggiato con trasformatore di isolamento che garantisce la separazione galvanica tra sezione in corrente continua e quella in corrente alternata;
- Sistemi in categoria I in corrente continua con punto di terra (analogo sistema TN in alternata), quando l'inverter dispone di trasformatore di isolamento e le stringhe sono vincolate al potenziale di terra;
- Sistema a bassissima tensione di protezione (SELV), nel caso in cui la tensione lato continua sia inferiore a 120V, non abbia alcun punto connesso a terra e la separazione tra la parte in alternata e quella in continua sia di tipo a doppio isolamento;
- Sistema a bassissima tensione di protezione (PELV), nel caso in cui la tensione lato continua sia inferiore a 120V, abbia un punto connesso a terra e la separazione tra la parte in alternata e quella in continua sia di tipo a doppio isolamento;
- Sistema a bassissima tensione funzionale (FELV), nel caso in cui l'inverter sia dotato di trasformatore di isolamento, la tensione in corrente continua sia inferiore a 120V e la separazione tra la parte in alternata e quella in continua preveda unicamente l'isolamento principale.

CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.6

Schemi elettrici utilizzati per gli impianti fotovoltaici

Analizziamo in dettaglio le misure di protezione da adottare in relazione ai sistemi elettrici presenti.

- **Sistemi TN e TT:** Si riportano i possibili anelli di guasto dei sistemi TN-S e TT in un impianto fotovoltaico con inverter privo di isolamento galvanico lato ca. Tutte le masse facenti parte di apparecchiature in classe I (cornici metalliche dei moduli fotovoltaici, involucri metallici dell'inverter, ecc) devono essere collegate al nodo equipotenziale con un conduttore PE di colore giallo-verde e di sezione opportuna. Sebbene la norma 64-8/4 non consenta la messa a terra degli involucri dei dispositivi di classe II, si dovrà procedere alla messa a terra delle masse indipendentemente dalla classe di isolamento dei componenti. La scelta è giustificata dal fatto che tutti i componenti sono ubicati all'esterno e pertanto risultano soggetti alle avversità climatiche, offrendo un'estensione superficiale dislocata su una vasta area.

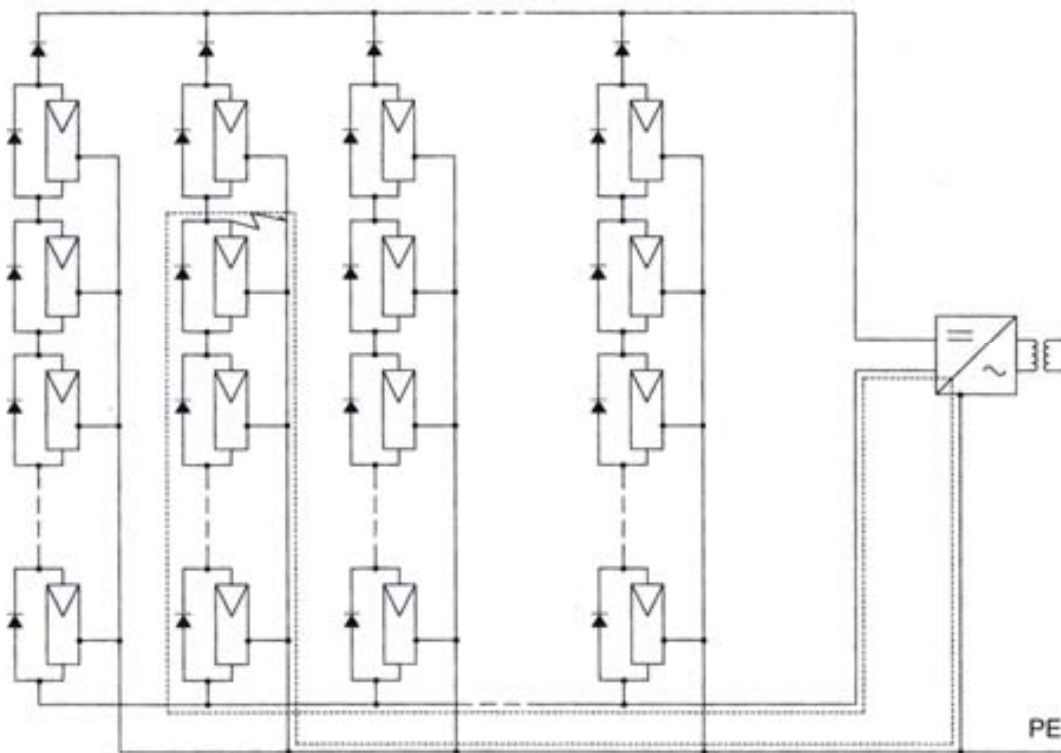


CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.7

Schemi elettrici utilizzati per gli impianti fotovoltaici

Analizziamo in dettaglio le misure di protezione da adottare in relazione ai sistemi elettrici presenti.

- **Sistemi IT:** Si riportano il possibile anelli di guasto che si può instaurare in un impianto fotovoltaico con inverter equipaggiato con trasformatore. Si realizza così un sistema assimilabile ad un IT. In condizioni di primo guasto a terra la corrente di guasto fluisce unicamente attraverso l'inverter. Come già visto per i sistemi TT e TNS anche nel caso di sistemi IT saranno collegate a terra tutte le apparecchiature di classe seconda e quelle di classe prima. Non è consigliabile collegare a terra, tramite nodo equipotenziale, le strutture metalliche di supporto installate all'esterno, fermo restando la raccomandazione di collegarle all'impianto LPS.



Modalità di collegamento conduttore giallo-verde di terra

- Sconduttore $\leq 16 \text{ mm}^2$ - SPE = Sconduttore;
- $16 \text{ mm}^2 < \text{Sconduttore} \leq 35 \text{ mm}^2$ - SPE = 16 mm^2 ;
- Sconduttore $> 35 \text{ mm}^2$ - SPE = Sconduttore/2;

CRITERI DI SICUREZZA PER GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI – pag.8

Schemi elettrici utilizzati per gli impianti fotovoltaici

Analizziamo in dettaglio le misure di protezione da adottare in relazione ai sistemi elettrici presenti.

- **Circuiti SELV e PELV:** L'adozione di un circuito a bassissima tensione di sicurezza (SELV) o a bassissima tensione di protezione (PELV) garantisce un buon livello di sicurezza elettrica del campo fotovoltaico nei confronti dei contatti diretti ed indiretti. Tuttavia tale scelta comporta i seguenti requisiti:
 - Tensione a vuoto delle stringhe < 120Vcc;
 - Inverter deve assicurare una classe di isolamento II tra sezione cc e sezione ca;
 - Conduttori devono essere separati da quelli di altri sistemi.
 - Nei circuiti SELV non è permesso collegare a terra le masse e le masse estranee.
- **Circuiti FELV:** L'adozione di un circuito a bassissima tensione funzionale (FELV) richiede una tensione a vuoto del campo fotovoltaico inferiore a 120Vcc e l'inverter dotato di semplice isolamento tra sezioni cc e ca. E' necessario adottare tutti i criteri di protezione nei confronti dei contatti diretti ed indiretti.

I DIODI DI BYPASS E DI BLOCCO

- Se in una serie costituita da molte celle ne viene ombreggiata una e, nel contempo, le terminazioni sono mantenute in corto circuito o ad una tensione molto bassa si può verificare il fenomeno detto *hot-spot*. La cella oscurata si trova, polarizzata inversamente con una tensione uguale o molto vicina alla tensione a vuoto di tutta la serie formata dalle celle rimanenti ed esposta al pericolo di entrare in conduzione inversa. In questo caso la cella si troverebbe a dover dissipare la potenza generata dalle rimanenti celle del modulo, provocando un aumento di temperatura localizzato (*hot-spot*) che può portare alla distruzione della cella per sovratemperatura. Per ovviare a questi problemi molti moduli montano nella morsettiera della cassetta di terminazione, i diodi detti di bypass per cortocircuitare e quindi isolare il singolo modulo.
- In serie ad ogni stringa sarà installato un diodo denominato “diodo di blocco” il cui scopo è quello di impedire che qualora l'erogazione della potenza delle stringhe non sia bilanciata, gli squilibri di tensione tra le stesse possano determinare correnti di circolazione pericolose.