



Università degli Studi di Torino  
Facoltà di Scienze MM. FF. NN.  
Classe dei Corsi di Laurea in Fisica



# MONITORAGGIO COMPARATIVO DI TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

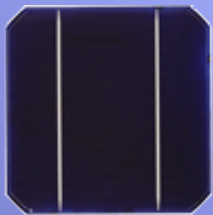
Candidato: Walter Spagnuolo

Relatore: Prof. Paolo Gambino

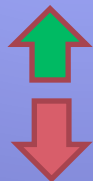
# Tecnologie fotovoltaiche

## Moduli in SILICIO CRISTALLINO

Silicio lavorato in modo da ottenere dei wafer, che vengono in seguito uniti tra loro

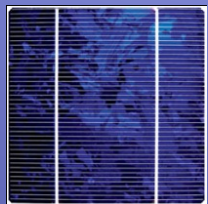


**Si - Monocristallino:** singolo cristallo cilindrico di puro silicio

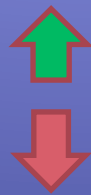


alta efficienza (fino al 16%), longevità

alto costo di produzione, grande spreco di materiale, fragilità.



**Si - Policristallino:** wafer non strutturalmente omogeneo ma organizzato in grani localmente ordinati



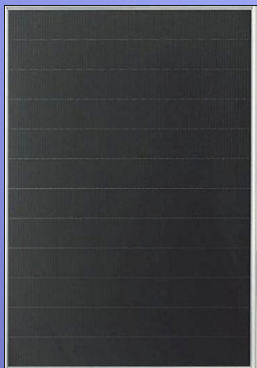
costi di produzione inferiori, minori sprechi, longevità

efficienza inferiore (12-14%), fragilità.

# Tecnologie fotovoltaiche

## Moduli a FILM SOTTILE

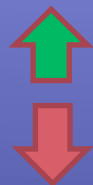
Sottilissimo strato (pochi micron) di materiale semiconduttore depositato per vaporizzazione su superficie metallica (o vetro), eventualmente flessibile.



**Si amorfo:** atomi di silicio lavorati nella loro forma amorfa.  
Eff. inferiore al 10%



**CIS (Diseleniuro di Indio Rame):** Giunzione tra CIS drogato-p e ZnO drogato-n.  
Eff. fino a 11-12%



meno materiale usato, costi di produzione inferiori, flessibilità

efficienza minore, vita più breve

# Condizioni di laboratorio vs condizioni reali

CONDIZIONI  
"REALISTICHE"



Posizionamento esterno

Irraggiamento naturale

Più variabili in gioco



Valori effettivi

STC  
(Standard Testing  
Conditions)



Laboratorio

Irraggiamento artificiale

Parametri fissati



• Irraggiamento 1000 W/mq

• T modulo = 25°C

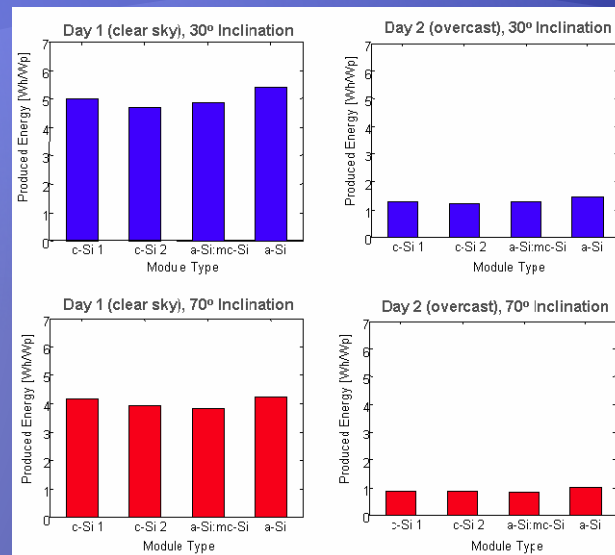
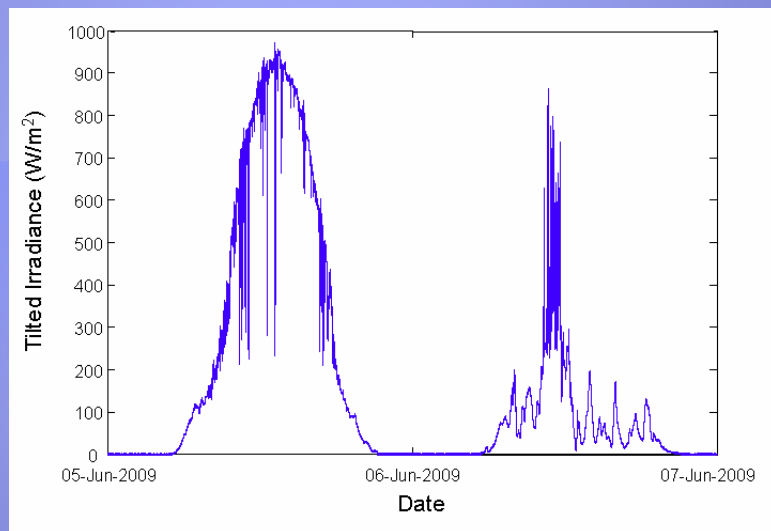
• Vento = 1 m/s

• Spettro solare = AM 1.5

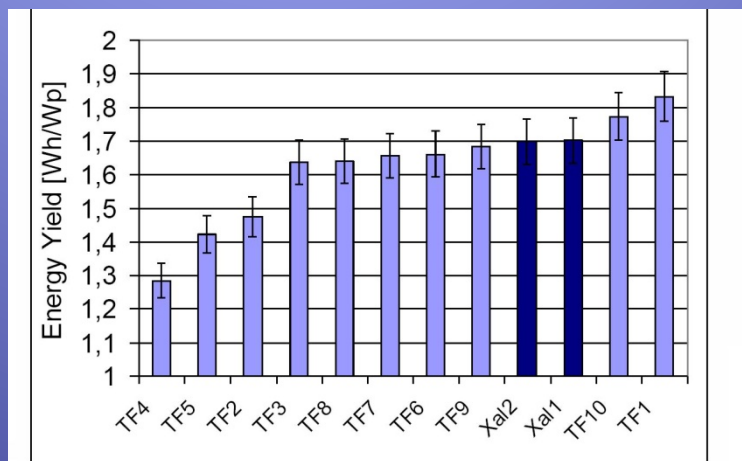
Valori nominali

# Esempi di studi svolti in Germania

(T. Ferenczi et al., *Specific Energy Yield Comparison between crystalline silicon and amorphous silicon based PV modules*, GE Global Research Europe, 2009)



(U. Jahn, M. Schweiger, W. Herrmann, *Comparison of different thin-film technologies – Performance characteristics obtained from laboratory and field tests*, 25th European Photovoltaic Solar Conference and Exhibition, 6-10 Sept. 2010, Valencia, Spain, 3769-3773)



Produttività specifica delle tecnologie tradizionali e a film sottile in una giornata con cielo coperto.

Caratteristiche comuni ad entrambi gli studi:

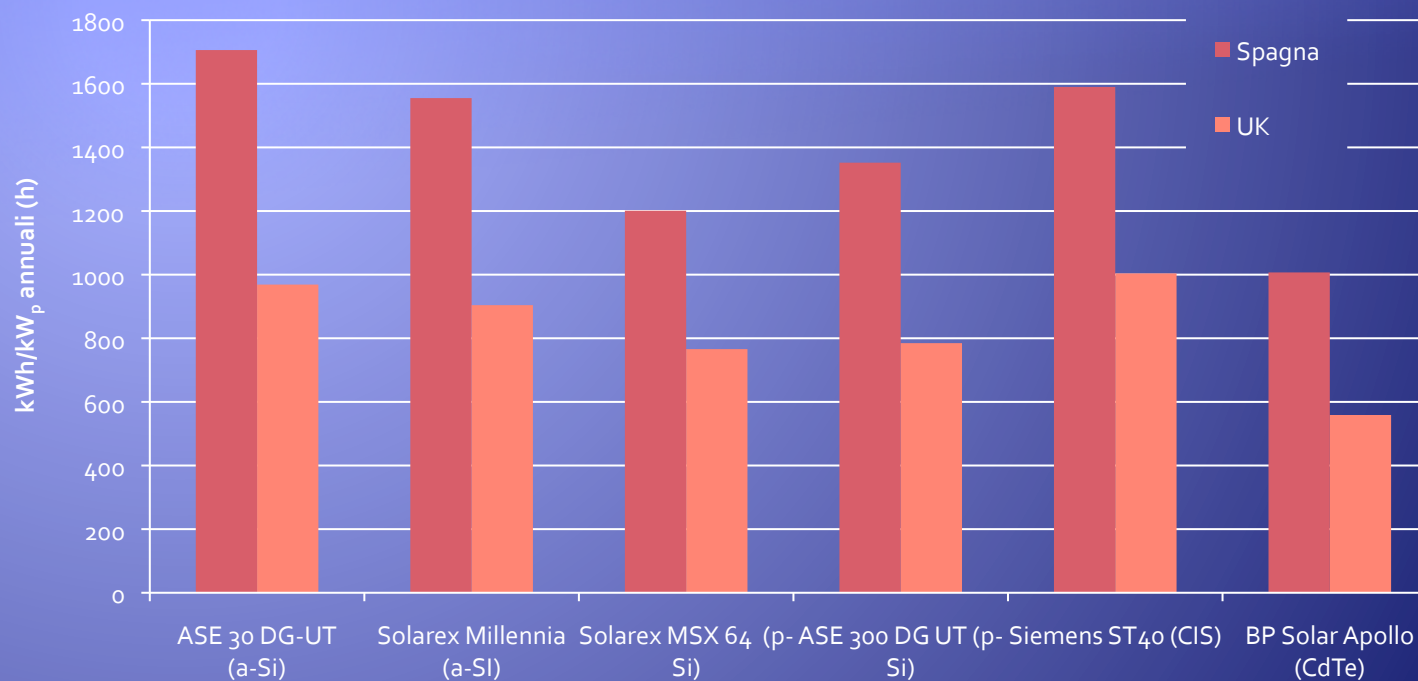
- analisi eseguite sia in laboratorio che all'esterno;
- studiate le performance in una giornata di cielo sereno e in una con condizioni di variabilità.

Mentre nel primo studio si conclude che il film sottile risulta più performante in entrambe le giornate, nel secondo non si riscontra una grande differenza tra film sottile e Si cristallino in condizioni di copertura.

# Studio dell'Università di Oxford

(J. Jardine et al., University of Oxford, "PV COMPARE: Direct Comparison of Eleven PV Technologies at Two Locations in Northern Europe and Southern Europe", University of Oxford, anno 2002?)

Confronto tra tecnologie fotovoltaiche attraverso l'analisi delle producibilità specifiche annuali riscontrate in due località poste a diversa latitudine : Maiorca (Spagna) e Oxford (UK).



- Le tecnologie CIS e Si amorfo (doppia giunzione) presentano producibilità specifiche maggiori rispetto alle altre tecnologie, in entrambe le località.

# Minilab EnergEticaMente



Si - mono e  
policristallino

CIS

Si amorfo  
microcristallino

“Minilab EnergEticaMente”  
Tetto dell’Istituto di Fisica di Torino.

# Caratteristiche impianto Minilab(1)

- Organizzazione dei moduli fotovoltaici in stringhe :

Tecnologia	Disposizione moduli	Superficie Totale [m <sup>2</sup> ]	P <sub>nom</sub> [Wp]	Eff. Nom. [%]
c-Si	1 stringa da 4 moduli	6,5	900	13,6
a-Si	4 stringhe da 2 moduli	11,4	960	8,4
CIS	1 stringa da 5 moduli	3,6	375	10,4

c-Si: tecnologia con silicio monocristallino e policristallino; a-Si: film sottile con Si amorfo microcristallino

- Da tenere presente che la stringa c-Si è composta da moduli diversi tra loro (unisce un monocristallino e tre policristallini di diversa origine). Questa decisione è motivata dalle caratteristiche quasi equivalenti in fatto di tensioni e correnti rispetto alle altre tecnologie citate.



# Caratteristiche impianto Minilab (2)



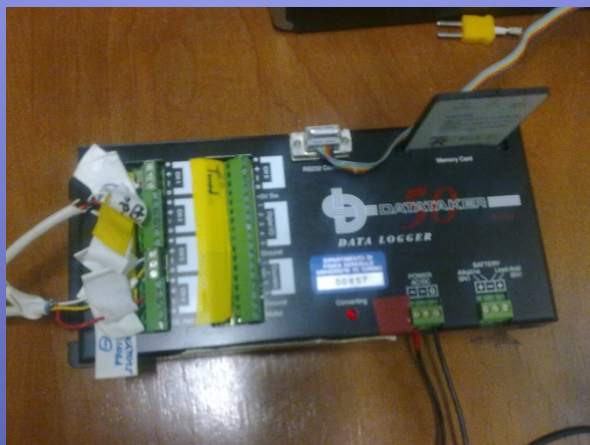
## Sequenziatore

Consente il funzionamento di una tecnologia per volta



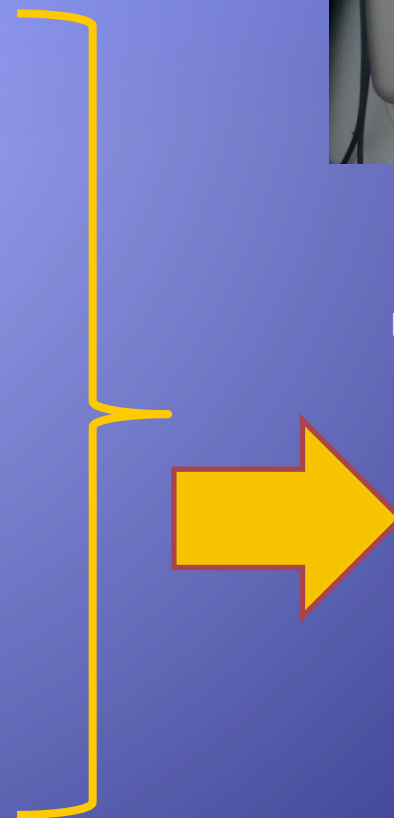
## Inverter

Converte in alternata la corrente continua proveniente dai moduli, e la immette in rete



## Data-Taker

Acquisisce i dati attraverso canali di ingresso e li immagazzina in una memory-card



**SISTEMA DI ACQUISIZIONE AUTOMATICO**

# Caratteristiche metrologiche dell'impianto

Canale di acquisizione

Grandezza

CH 1

Tensione continua

CH 2

Corrente continua

CH 3

Irraggiamento

CH 4

Segnale di  
identificazione  
Stringa

CH 5

Temperatura del  
modulo\*

in uscita dai moduli  
e in ingresso  
all'inverter  
tramite il  
piranometro  
grazie al  
sequenziatore  
mediante  
termocoppia di tipo  
K

$$P_{dc} = V_{dc} \times I_{dc}$$

## Stima delle incertezze del sistema di acquisizione automatico

<u>grandezza</u>	<u>sistema di acquisizione</u>	<u>incertezza [%]</u>
Corrente Continua ( $I_{dc}$ )	trasduttore + data-taker	<1%
Tensione Continua ( $V_{dc}$ )		
Irraggiamento	sensore + data-taker	2%
Temperatura modulo	sonda K + data-taker	5%

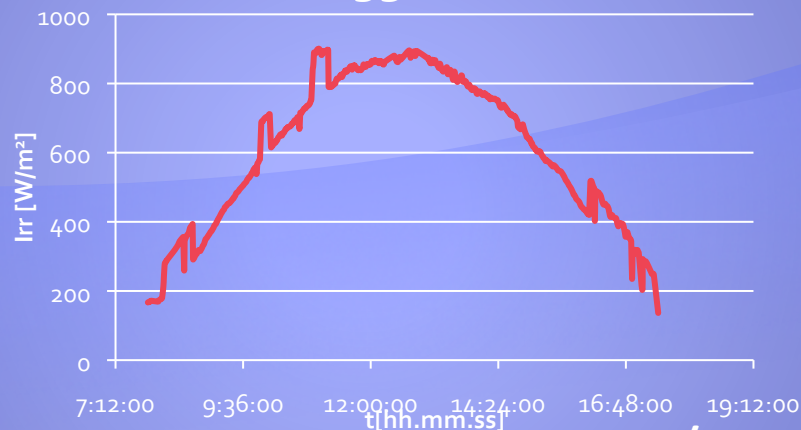


**Incertezza inferiore al 2% sulle potenze calcolate**

# Condizioni di cielo sereno:

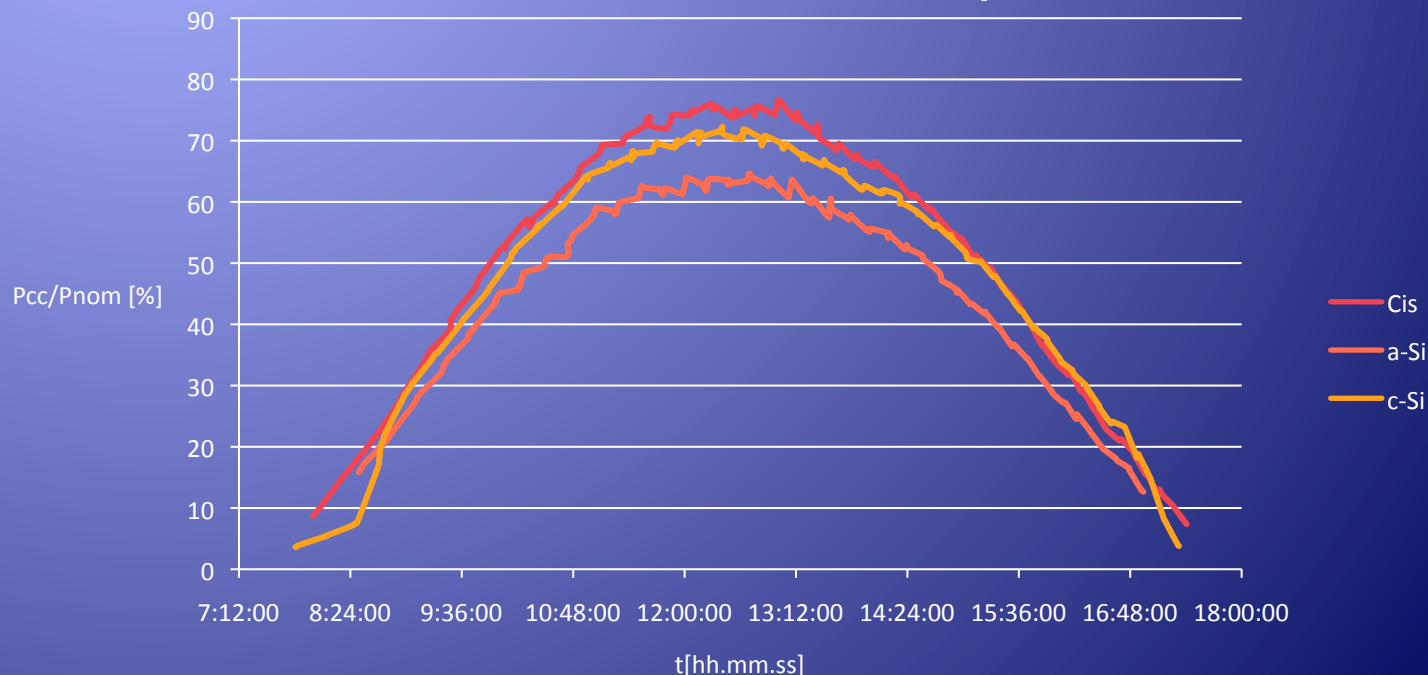
(giorno 2 marzo 2012)

## Irraggiamento



- $Irr > 100 \text{ W/m}^2$
- Normalizzazione delle potenze di ciascuna stringa rispetto al corrispondente valore nominale e conseguente confronto tra tecnologie.

## P<sub>cc</sub>/P<sub>nom</sub> in funzione del tempo



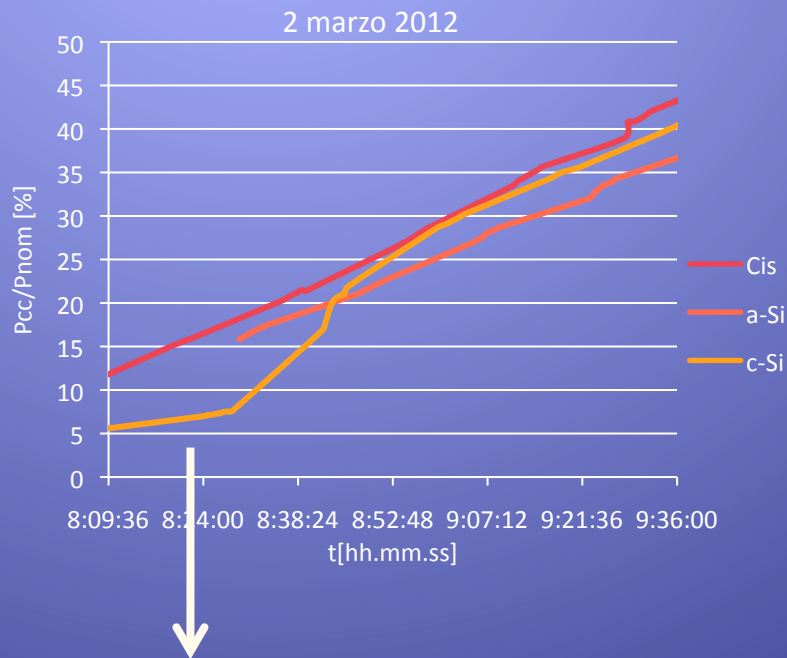
c-Si: tecnologia con silicio monocristallino e policristallino; a-Si: film sottile con Si amorfo microcristallino



# Cielo sereno: condizioni di basso irraggiamento mattino

$100 \text{ W/m}^2 < I_{rr} < 500 \text{ W/m}^2$

mattino	Estate		Autunno				Primavera			
	05/07/2011		17/11/2012		18/11/2012		02/03/2012		03/03/2012	
	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%
CIS	0,42	100,0	0,27	100,0	0,25	100,0	0,31	100,0	0,27	100,0
MC+PC	0,33	78,6	0,12	45,5	0,12	47,0	0,22	72,3	0,19	69,3
AMC	0,41	97,6	0,19	72,2	0,17	70,2	0,25	79,8	0,21	77,6



Presenza di ombre sui moduli c-Si

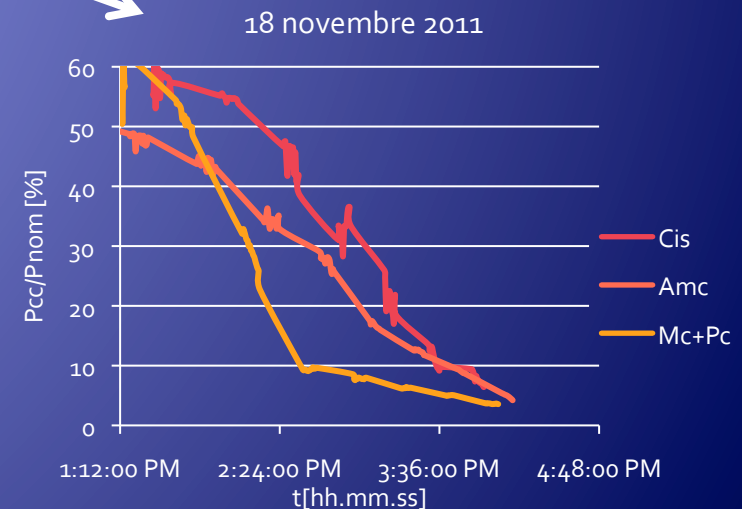
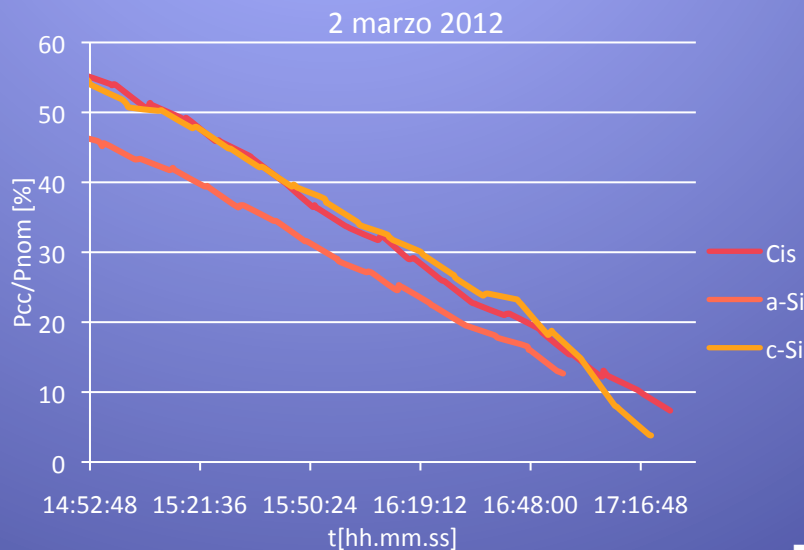
- La tecnologia a film sottile sembra fornire migliori prestazioni rispetto al Si cristallino.
- Il silicio microamorfo è paragonabile al CIS in estate, ma peggiora in autunno e primavera.
- Il silicio cristallino presenta valori più bassi, ma potrebbe essere penalizzato dall'installazione. È necessario indagare la presenza di ombre in autunno e primavera, mentre bisogna valutare l'effetto della temperatura in estate.

# Cielo sereno: condizioni di basso irraggiamento

sera

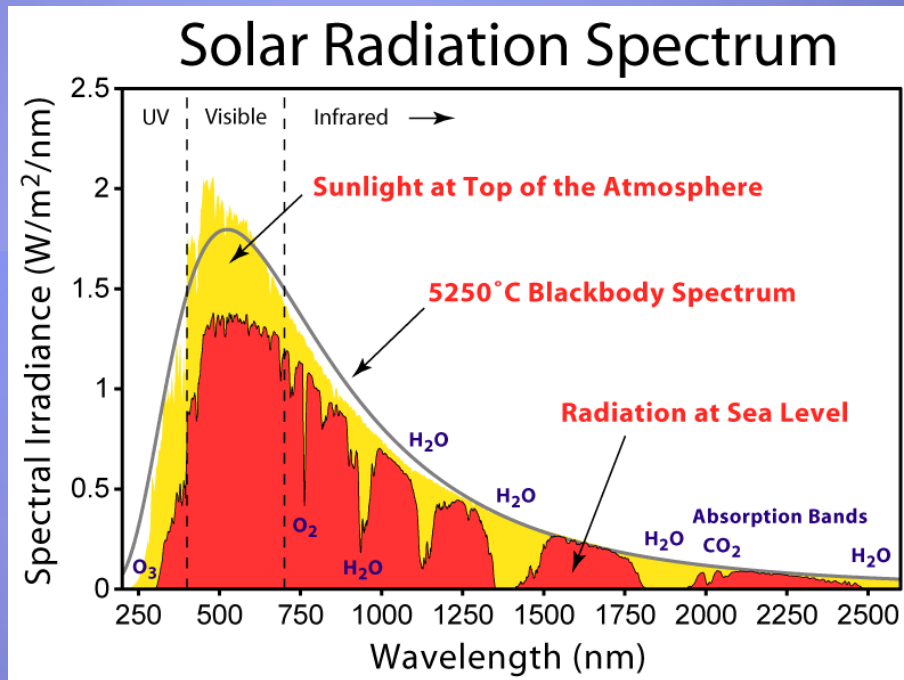
$100 \text{ W/m}^2 < I_{rr} < 500 \text{ W/m}^2$

sera	Estate		Autunno				Primavera			
	05/07/2011		17/11/2012		18/11/2012		02/03/2012		03/03/2012	
	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%	[kWh/kWp]	%
CIS	0,34	97,1	0,125	100	0,13	100	0,26	84,5	0,20	88,8
MC+PC	0,35	100,0	0,061	49,0	0,07	49,1	0,31	100	0,23	100
AMC	0,32	91,4	0,118	94,7	0,13	95,2	0,22	72,7	0,18	78,3



- Prima di eventuali conclusioni circa il comportamento autunnale del c-Si è necessaria una verifica in assenza di ombre.

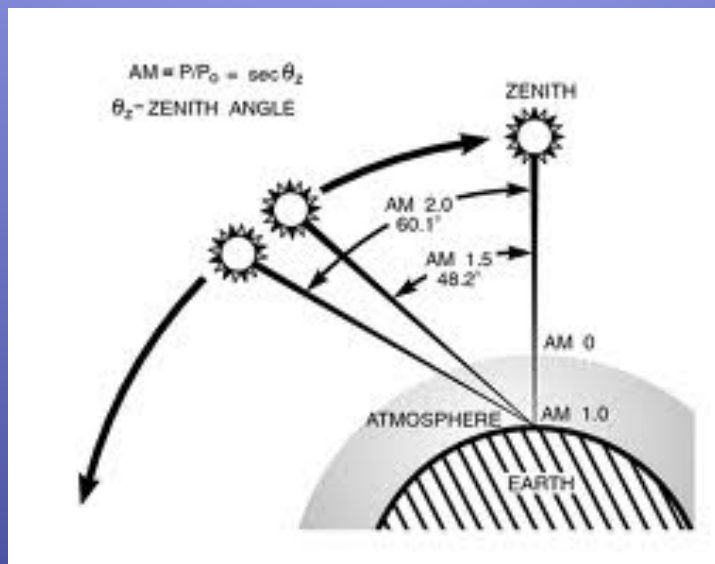
# Spettro della radiazione solare



La radiazione elettromagnetica  $G(\lambda)$ , all'esterno dell'atmosfera, ha una distribuzione spettrale (AM<sub>0</sub>) dall'ultravioletto all'infrarosso con un massimo nel campo del visibile. La corrispondente densità di potenza, incidente sull'area unitaria perpendicolare al raggio, è nota come *costante solare*:

$$G_0 = \int G(\lambda) d\lambda \approx 1,367 \text{ W/m}^2$$

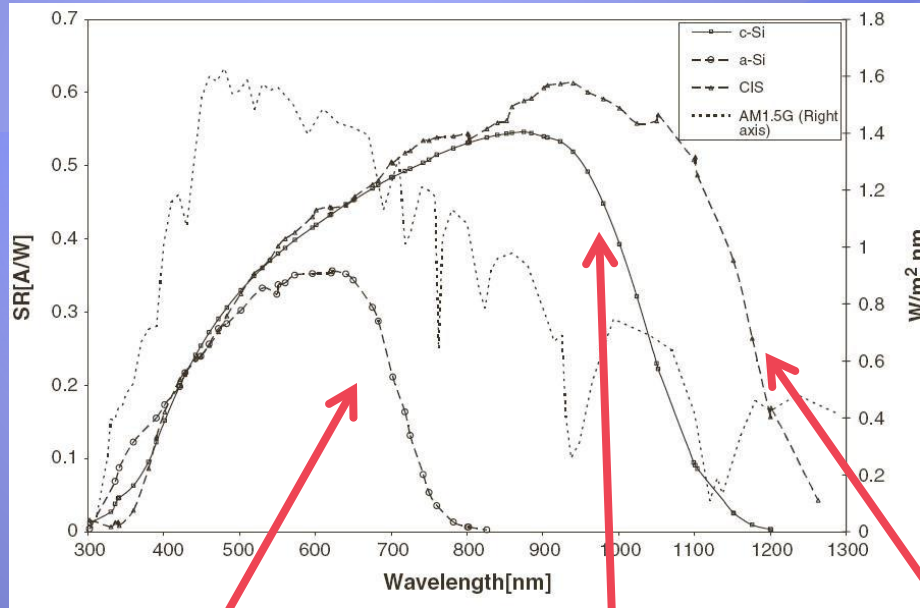
Nell'attraversare l'atmosfera, la radiazione elm subisce fenomeni di assorbimento e diffusione che ne attenuano e mutano lo spettro.



Il concetto di *Air Mass* coefficient (AM) permette di distinguere lo spettro di radiazioni che giungono alla superficie terrestre con differenti inclinazioni rispetto allo Zenith.

$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos \vartheta_z}$$

# Risposta spettrale



Si amorfo  
( $E_g = 1,7$  eV)

Si cristallino  
( $E_g = 1,1$  eV)

CIS  
( $E_g = 1,05$  eV)

**Risposta spettrale (SR):** è definita come il rapporto tra la misura della corrente generata dalla cella fotovoltaica (misurata in A) e la potenza incidente (misurata in W).

La SR in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$  dipende dall'Energy Gap ( $E_g$ ) del semiconduttore: maggiore è l'  $E_g$ , maggiore sarà l'energia richiesta ai fotoni per promuovere un elettrone in banda di conduzione.



# Stima del rendimento dei moduli a partire dalla risposta spettrale

È possibile ricavare il rendimento a partire dalla risposta spettrale attraverso alcuni passaggi:

- calcolo della corrente di corto-circuito  $I_{sc}$

$$I_{sc} = A \int_0^{\lambda(E_g)} G(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda \Rightarrow I_{sc} = A \sum_{\lambda} \Delta\lambda \cdot G(\lambda) \cdot SR(\lambda)$$

- determinazione della tensione di circuito aperto  $V_{oc}$  attraverso

$$I = I_0 e^{\left(\frac{eV}{mkT} - 1\right)} \Rightarrow V_{oc} = \frac{mkT}{e} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

(con  $e$  carica dell'elettrone,  $T$  temperatura assoluta della cella,  $k$  costante di Boltzmann,  $m$  fattore di qualità della giunzione)

- determinazione dell'efficienza a partire dal fill factor FF,

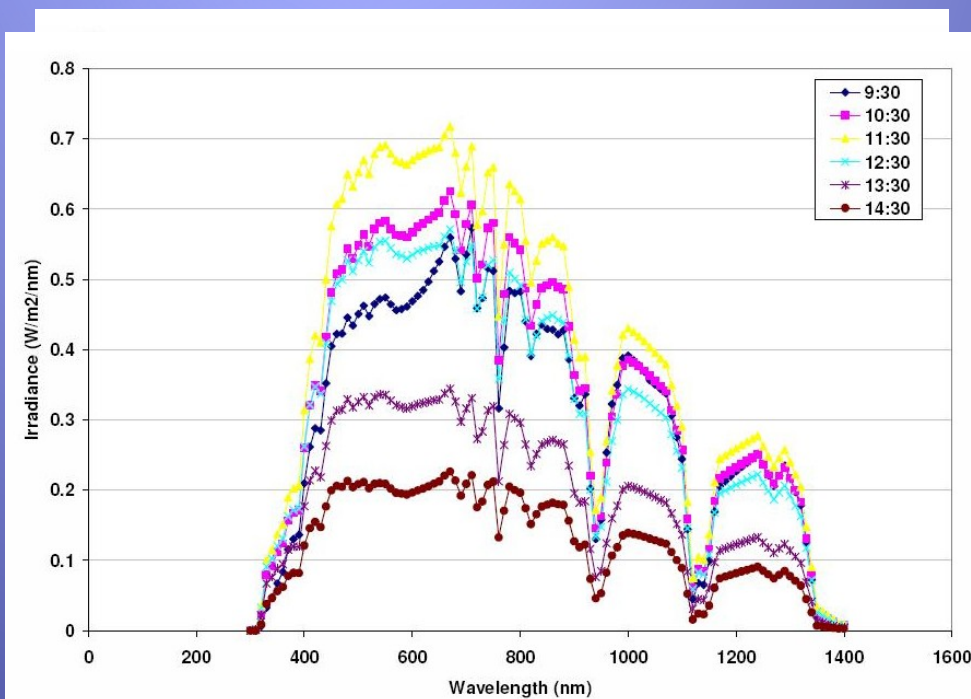
$$FF = \frac{P_{peak}}{V_{oc} I_{sc}} \Rightarrow \eta = \frac{P_{peak}}{G}$$

# Stima del rendimento in STC

Spettro AM 1.5

<u>Tecnologia</u>	<u>Efficienza</u>	<u>Eff. Nom.</u>
Film sottile (a-Si)	8,1%	8,4%
Silicio monocristallino	13,4%	13,6%

## Stima del rendimento con spettro serale



- Lo spettro in figura è soggetto a normalizzazione rispetto a STC (intensità  $I = 1000 \text{ W/m}^2$ )

<u>Tecnologia</u>	<u>Efficienza</u>
Film sottile (a-Si)	7,5%
Silicio monocristallino	15,8%

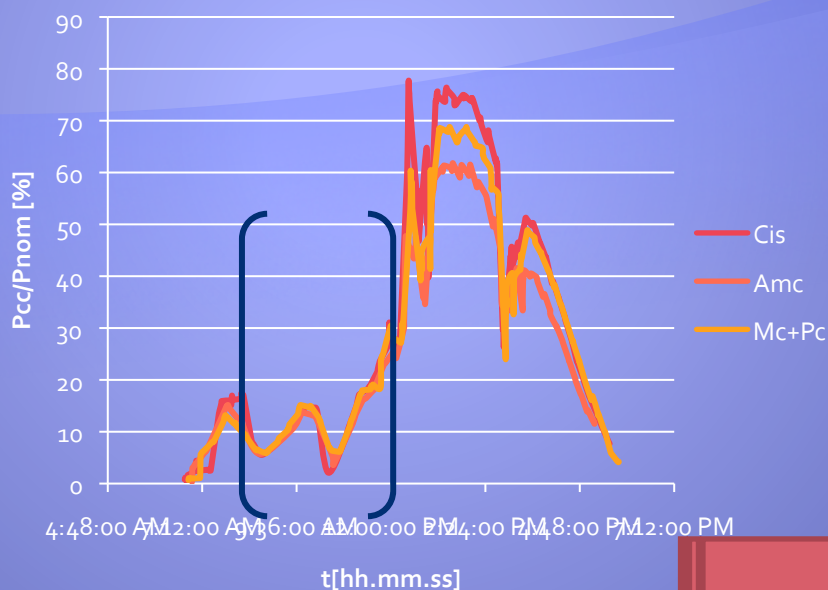
# Conclusioni

Alla luce dei risultati sperimentali e della stima dei rendimenti a partire dalle risposte spettrali è possibile concludere che:

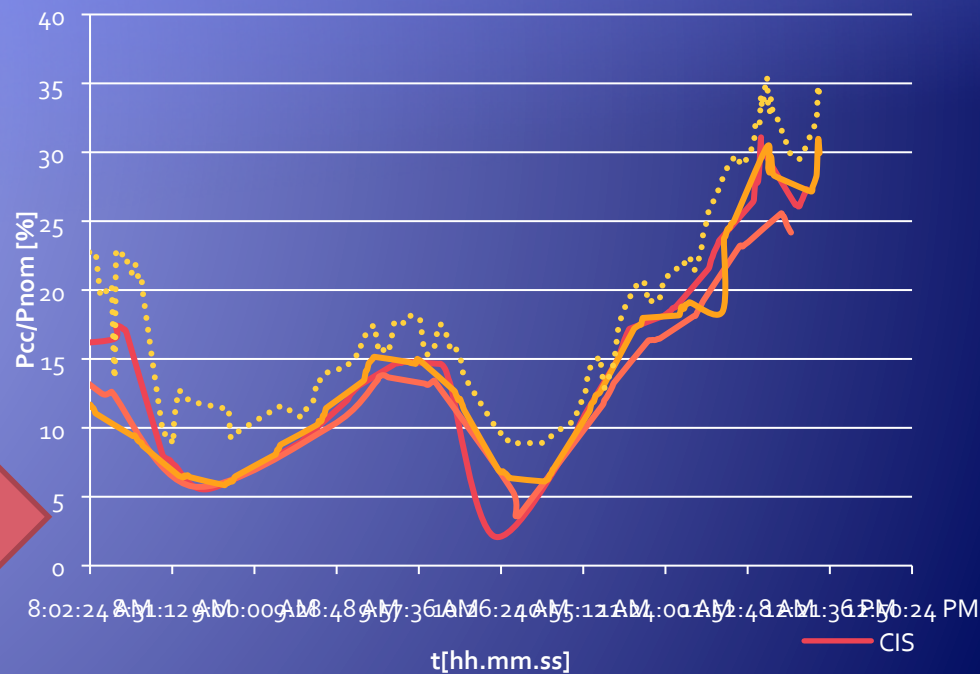
- la tecnologia CIS risulta quella che meglio si adatta a queste latitudini e a queste condizioni climatiche per le migliori prestazioni fornite rispetto alle altre tecnologie nella maggior parte delle situazioni studiate;
- Silicio amorfo meno competitivo rispetto alla tecnologia CIS, non confermando così quanto riportato in alcuni articoli presenti in letteratura;
- i moduli in Silicio monocristallino o policristallino risultano competitivi con le tecnologie a film sottile in condizioni di basso irraggiamento (ore serali) grazie alla buona risposta spettrale (simile a quella del CIS) a grandi lunghezze d'onda.

# Cielo coperto: esempio di condizioni di luce diffusa (cenni)

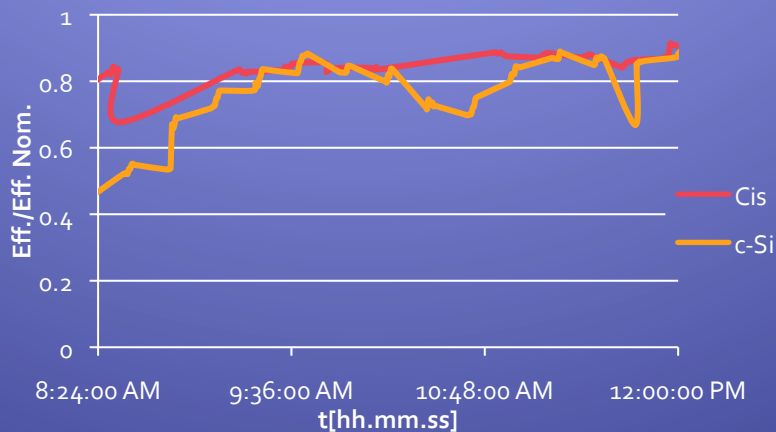
Pcc/Pnom giorno 25 marzo



Pcc/Pnom in condizioni di copertura –  
 $100 < I_{rr} < 400 \text{ W/m}^2$



Eff./Eff.nom. in funzione del tempo



- Non sembra esservi supremazia del film sottile sul Si cristallino.

# Problematiche e suggerimenti per il futuro

- Fino allo scorso autunno il DT registrava valori inferiori del 30-40% sui canali scelti per l'irraggiamento e per la temperatura del modulo, e questo a causa dell'introduzione da parte del sequenziatore di un disturbo attribuibile ai diversi riferimenti di massa da parte dei due strumenti ,e traducibile in uno shift verso il basso dell'ordine del millivolt, comunque fatale in quanto paragonabile alle grandezze in gioco. Nonostante un collegamento dei due strumenti ad un riferimento di terra comune, persistono ancora disturbi sul canale dell'irraggiamento.
- Difficile l'analisi di giornate con condizioni di copertura a causa della soglia posta a  $100\text{W}/\text{m}^2$  in quanto:
  - al di sotto di tale soglia è probabile che non tutte le tecnologie siano attive e quindi non sarebbe possibile un confronto;
  - al di sotto di tale soglia le incertezze assolute hanno un peso rilevante.
- Necessario un monitoraggio delle ombre sui moduli (in particolare su quelli in c-SI) soprattutto in periodo autunnale e primaverile.

**Grazie per l'attenzione**

# (Bibliografia)

## Esame della letteratura

- ◆ J. Jardine et al., University of Oxford, “*PV COMPARE: Direct Comparison of Eleven PV Technologies at Two Locations in Northern Europe and Southern Europe*”, University of Oxford, anno 2002?
- ◆ T. Ferenczi et al., *Specific Energy Yield Comparison between crystalline silicon and amorphous silicon based PV modules*, GE Global Research Europe, 2009
- ◆ U. Jahn, M. Schweiger, W. Herrmann, *Comparison of different thin-film technologies – Performance characteristics obtained from laboratory and field tests*, 25th European Photovoltaic Solar Conference and Exhibition, 6-10 Sept. 2010, Valencia, Spain, 3769-3773
- ◆ J. J. Perez-Lopez et al., “*Experimental Solar Spectral Irradiance Until 2500 nm: Results and Influence on the PV Conversion of Different Materials*”, in “*Progress in photovoltaics: research and applications*”, 2007, 15:303–315
- ◆ Bamshad Houshyani, “*The Effect of a Varying Solar Spectrum on Solar Cells Energy Performance. (A Comparison between Simulated Actual and Air Mass 1.5 Standard Spectra by Modeling Spectra Using SEDES2 and Minutely Measured Irradiation Datasets from KNMI, Cabauw, the Netherlands.)*”, Final Report MSc Thesis, Copernicus institute for sustainable development and innovation – Department of Science, Technology and Society (STS), Utrecht University – NWS-E-2006-241, Dec. 2006

Fino allo scorso autunno il DT registrava valori inferiori del 30-40% sui canali scelti per l'irraggiamento e per la temperatura del modulo, e questo a causa dell'introduzione da parte del sequenziatore di un disturbo attribuibile ai diversi riferimenti di massa da parte dei due strumenti, e traducibile in uno shift verso il basso dell'ordine del millivolt, comunque fatale in quanto paragonabile con le grandezze in gioco. Nonostante un collegamento dei due strumenti ad un riferimento di terra comune, persistono ancora disturbi sul canale dell'irraggiamento

Nonostante un collegamento del sequenziatore e del DT ad un riferimento di terra comune





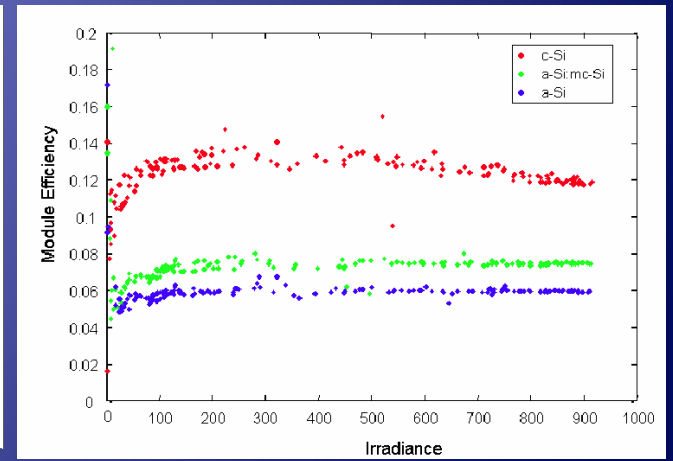
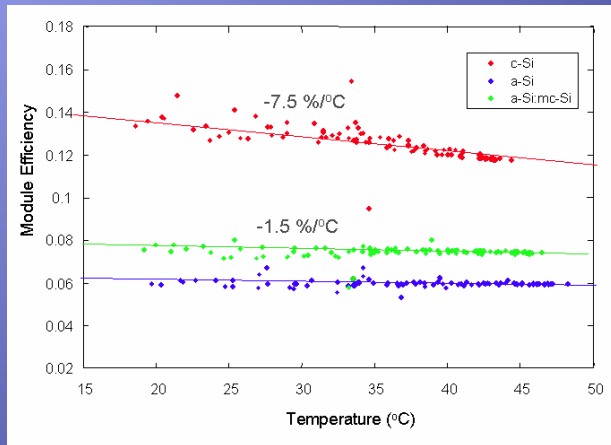




Valori di efficienza di conversione calcolati a partire dalle prove effettuate durante il collaudo dell'impianto (1 marzo 2012).

	<b>Efficienza di conversione [%]</b>	<b>Efficienza nominale di conversione [%]</b>
<b>MC+PC (1)</b>	12,0	13,6
<b>AMC (2)</b>	7,0	8,6
<b>CIS (3)</b>	10,1	10,4

Confronto con i valori di efficienza di conversione ottenuti dallo studio della risposta spettrale.



giornata intera	Estate		Autunno		Primavera	
	03/07/2011	05/07/2012	17/11/2012	18/11/2012	02/03/2012	03/03/2012
1) CIS	5,565	5,84	3,88	3,59	4,52	4,29
2)MC+PC	5,471	5,51	3,39	3,07	4,18	3,95
3)AMC	5,420	5,39	2,98	2,90	4,09	3,64

- ◆ Differenza di producibilità tra le tecnologie riscontrata durante la singola giornata ed espressa in termini di percentuale rispetto a quella del CIS.



in percentuale					
Estate		Autunno		Primavera	
03/07/2011	05/07/2011	17/11/2011	18/11/2011	02/03/2012	03/03/2012
100	100	100	100	100	100
98,3	94,3	87,4	85,4	92,5	92,3
97,4	92,3	76,7	80,6	90,6	85,0

Lo stesso è stato fatto per le tabelle relative alle producibilità della mattina e della sera.

giornata intera	Estate		Autunno		Primavera	
	3/7/11	5/7/11	17/11/11	18/11/11	2/3/12	3/3/12
1) CIS	5,565	5,84	3,88	3,59	4,52	4,29
2)MC+PC	5,471	5,51	3,39	3,07	4,18	3,95
3)AMC	5,420	5,39	2,98	2,90	4,09	3,64

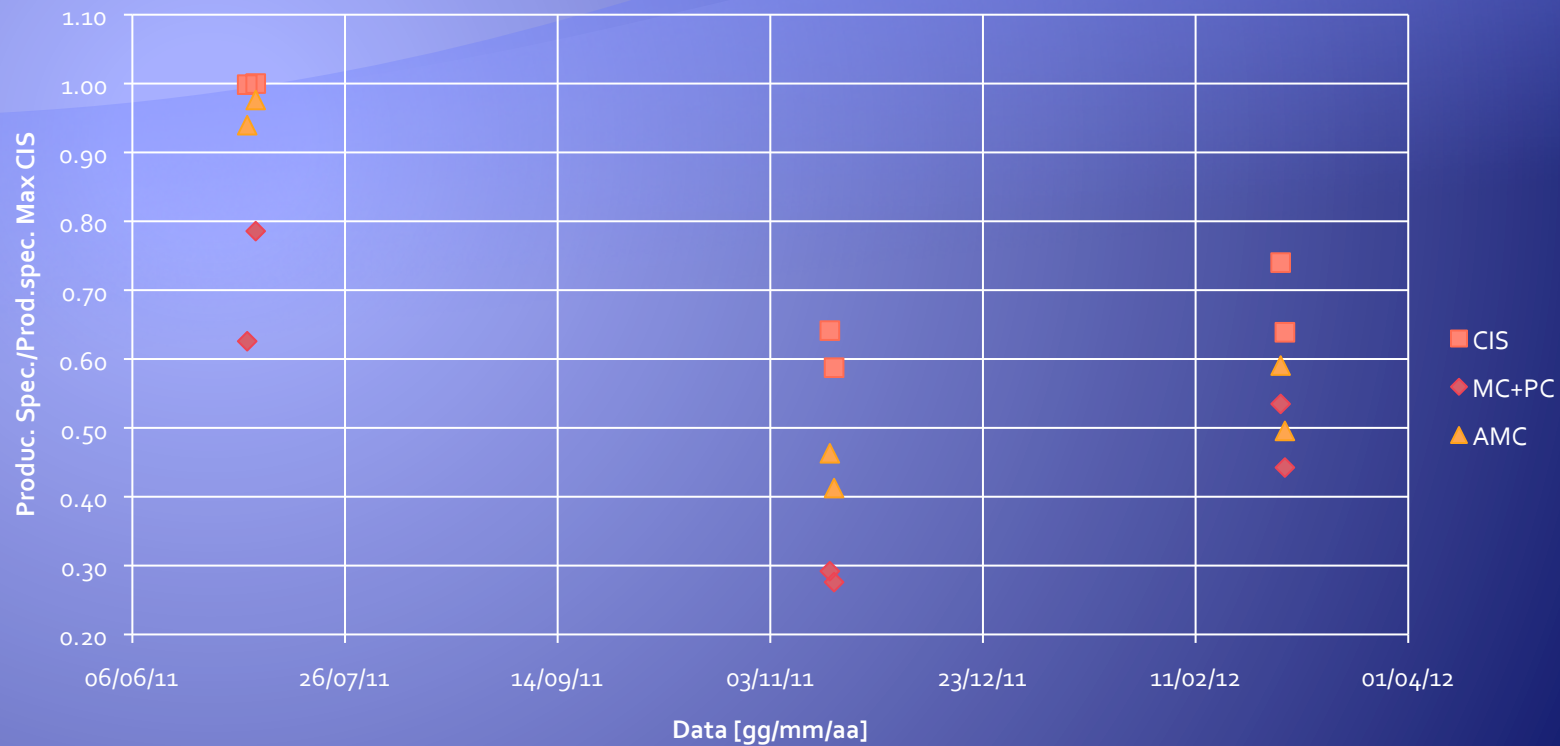
- ◆ Differenza di producibilità tra le tecnologie riscontrata durante l'anno rispetto a quella massima ottenuta dal CIS.
- ◆ Valori utilizzati nei grafici che seguono per meglio rappresentare e confrontare i comportamenti delle tre tecnologie.



in percentuale					
Estate		Autunno		Primavera	
3/7/11	5/7/11	17/11/11	18/11/11	2/3/12	3/3/12
0,95	1,00	0,66	0,61	0,77	0,73
0,94	0,94	0,58	0,53	0,72	0,68
0,93	0,92	0,51	0,50	0,70	0,62

Lo stesso è stato fatto per le tabelle relative alle producibilità della mattina e della sera.

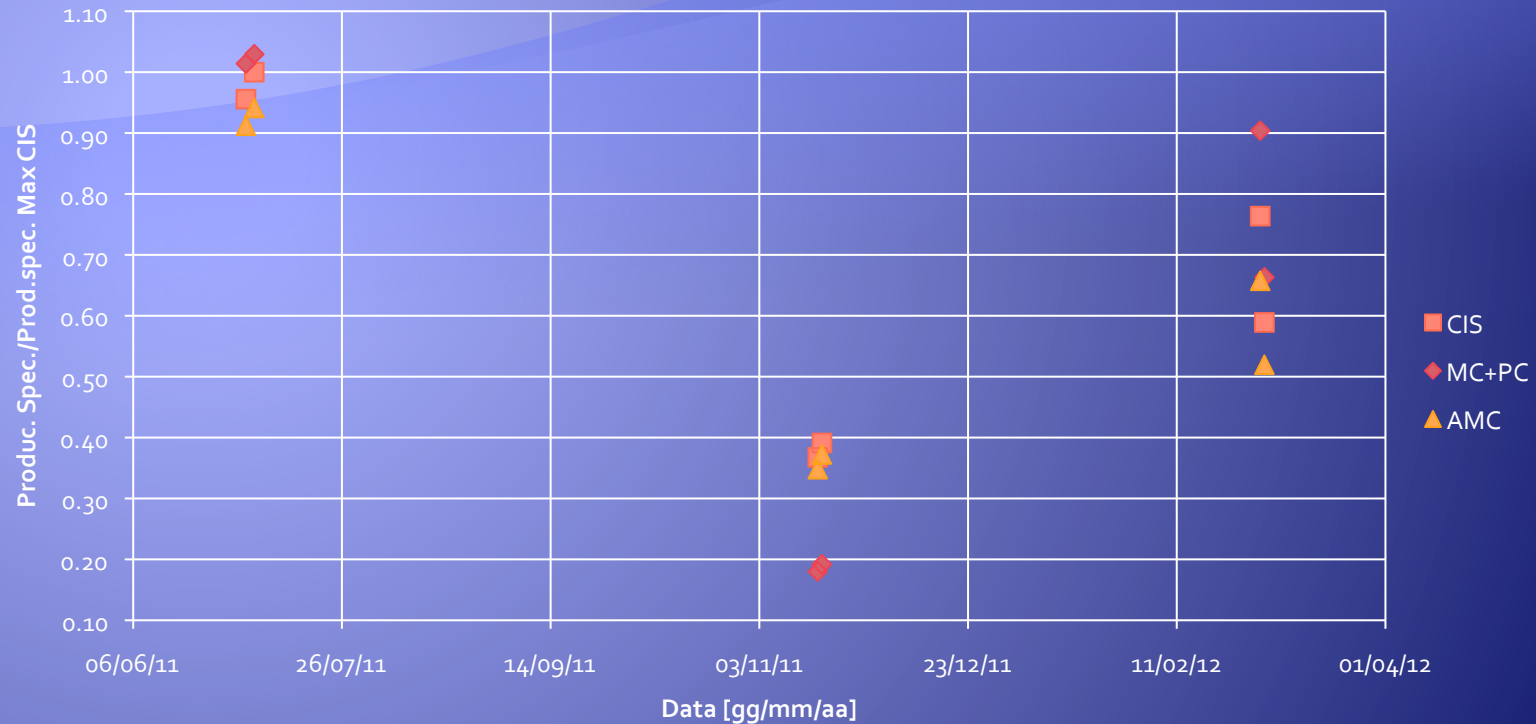
## Mattina



- ◆ Il silicio microamorfo è paragonabile (entro il ) al CIS in estate, ma peggiora in autunno e primavera.
- ◆ Il silicio cristallino presenta valori molto bassi, ma potrebbe essere penalizzato dall'installazione. È necessario indagare la presenza di ombre dovute alla tettoia.



## Sera



- ◆ Le tre tecnologie presentano producibilità paragonabili in estate e autunno.
- ◆ Le sere d'autunno il policristallino sembra essere svantaggiato dalla presenza di ombre dovute ai cavalletti.
- ◆ I valori primaverili sono poco ripetibili (?).

# Cenni sulla radiazione solare

