

Rapport final PV R+D, DIS 36508 / 76324, Septembre 2004

Qualità e resa energetica di moduli ed impianti fotovoltaici centrale LEEE-TISO periodo VI: 2000-2003

élaboré par

**D. Chianese, N. Cereghetti, G. Friesen, E. Burà, A. Realini, S. Rezzonico, G. Travaglini,
A. Bernasconi, Laboratorio Energia Ecologia ed Economia – LEEE
Dipartimento Ambiente Costruzioni e Design – DACD
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana - SUPSI
CP 110,6952 Canobbio**



Mandante:

Programma di ricerca fotovoltaico
Ufficio federale dell'energia

Mandatario:

Laboratorio Energia Ecologia ed Economia, DACD, SUPSI

Autori:

Domenico Chianese
Nerio Cereghetti
Gabi Friesen
Enrico Burà
Antonella Realini
Sandro Rezzonico

Giorgio Travaglini, responsabile LEEE dal 1998 a maggio 2001
Angelo Bernasconi, responsabile LEEE a partire da aprile 2003

2004

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Photovoltaik“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ABSTRACT (in english).....	5
RIASSUNTO.....	6
1 Introduzione	7
2 Misure Indoor	9
2.1 Abstract (in English).....	9
2.2 Introduzione	10
2.3 Certificazione ISO 17025.....	10
2.4 Caratteristiche Simulatore Solare	10
2.5 Misure I-V di confronto e calibrazioni a STC	11
2.6 Taratura strumenti.....	12
2.7 Calcolo dell'incertezza di misura	13
2.8 Misure I-V dirette, inverse e Multiflash.....	13
2.9 Misure I-V di ripetibilità a STC	15
2.10 Misure I-V con variazioni di temperatura e irraggiamento	15
2.11 Armadio termostatico	18
2.12 Misure per terzi	19
2.13 Conclusione	20
3 Misure a corto termine Outdoor.....	21
3.1 Abstract (in English).....	21
3.2 Introduzione	22
3.3 Struttura e inseguitore del sole	22
3.4 Sistemi di misura della caratteristica I-V (outdoor)	24
3.4.1 I-V Tracer – PVCT	24
3.4.2 I-V Tracer – IVAQ	25
3.4.3 Box trasportabile per misure dedicate con moduli a MPPT	25
3.5 Conclusione	26
4 Misure a medio termine Outdoor	27
4.1 Abstract (in English).....	27
4.2 Introduzione	30
4.3 Procedura di test – cicli di collaudo	31
4.4 Metodi di misura e sistema di acquisizione dati.....	33
4.5 Scelta e acquisto dei moduli da collaudare	35
4.5.1 Scelta dei moduli	35
4.5.2 Acquisto	35
4.5.3 Conclusione	35
4.6 Misure di Potenza	36
4.6.1 Degrado iniziale nei moduli c-Si	38
4.6.2 Degrado iniziale e a medio termine nei moduli thin film	41
4.6.3 Degrado a medio termine nei moduli c-Si	42
4.6.4 Riassunto dei degrading, dipendenti dalla tecnologia	42
4.6.5 References	42
4.7 Garanzie dei fabbricanti	44
4.7.1 Definizione delle garanzie	44
4.7.2 Garanzie e valori reali a confronto	45
4.7.3 References	48
4.8 Energia.....	49
4.8.1 Confronto commerciale della produzione d'energia	49
4.8.2 Confronto tecnologico della produzione d'energia	51
4.9 Comportamento dei moduli in condizioni reali	53
4.10 Pronostico della resa energetica con il metodo delle matrici.....	61
4.10.1 Introduzione.....	61
4.10.2 Descrizione del metodo.....	61
4.10.3 Informazioni ottenute con il metodo delle matrici.....	62
4.10.4 La misura delle matrici	64
4.10.5 La matrice di potenza	66
4.10.6 La matrice meteo.....	70

4.10.7	Precisione del metodo delle matrici	71
4.10.8	Il metodo delle matrici applicato a diverse strutture di montaggio	74
4.10.9	Confronto tra diversi laboratori.....	75
4.10.10	Pronostico della resa energetica di moduli a film sottile	78
4.10.11	Studio statistico sulla produzione d'energia di moduli a silicio cristallino	80
4.10.12	Metodo per la prima stima della produzione d'energia di un modulo a silicio cristallino ..	81
4.10.13	Conclusioni.....	82
4.11	Riassunto conclusioni: misure a medio termine	84
5	Misure a lungo termine Outdoor	86
5.1	Abstract (in English).....	86
5.2	Impianto TISO 10kW sc-Si, 20 anni di attività	87
5.2.1	Introduzione	87
5.2.2	Produzione di energia e comportamento in condizioni reali.....	87
5.2.3	Misure @ STC sui moduli di riferimento	90
5.3	Impianto TISO 4kW a-Si	91
5.3.1	Produzione di energia e comportamento in condizioni reali.....	91
5.3.2	Isolamento termico di una serie di moduli	92
5.3.3	Misure a STC sui moduli di riferimento	93
5.4	Impianto TISO 0.5kW a-Si triple-junction.....	95
5.5	Altri impianti TISO ad uso didattico.....	97
5.5.1	Impianti collegati alla rete	97
5.5.2	Impianti autonomi	98
5.6	Statistica cantonale degli impianti PV allacciati alla rete	99
5.7	Conclusione	101
6	Divulgazione delle informazioni e formazione	102
6.1	Abstract (in English).....	102
6.2	Introduzione	103
6.3	LEEE homepage.....	103
6.4	LEEE-News.....	104
6.5	Simposio Nazionale fotovoltaico 2002.....	105
6.6	Corsi di formazione	108
6.7	La banca dati dei moduli	110
6.8	Divulgazione del fotovoltaico nelle scuole	111
6.9	Conclusione	113
7	Consulenze e servizi esterni.....	114
8	Collaborazioni nazionali ed internazionali	116
8.1	Nazionali	116
8.2	Internazionali.....	116
9	Pubblicazioni scientifiche.....	117
10	Pubblicazioni informative.....	118
11	Workshop e presentazioni.....	119
12	Riconoscimenti	120
13	Conclusioni.....	121
14	Ringraziamenti	124

ABSTRACT (IN ENGLISH)

The LEEE-TISO test laboratory for photovoltaic modules has been set up in the early '90. Between 1991 and 2003 80 different types of photovoltaic (PV) modules have completed a full test cycle following a procedure which has been developed in order to satisfy the requirements of the continuously expanding world-wide market.

Above all a PV customer wants to be informed about:

- the quality of PV modules;
- the energy production of PV modules respect to the local climatic conditions and their type of integration;
- the long term reliability of the PV modules;

In order to satisfy these needs the PV modules undergo a test cycle comprising: an outdoor exposure under real operating conditions of a duration of 15 months, a measurement of the produced energy and regular verifications of their electrical parameters. During the test phase an initial degradation can be observed for all technologies, followed by a time in which the PV module performance stabilises.

In the period of this project the LEEE TISO further extended its activities through the acquisition of a class A solar simulator for the execution of current-voltage (I-V) measurements of PV modules under standard test conditions (STC) 1000W/m², 25°C and AM1.5. According to the IEC 60904-1 PV standard the I-V measurement has been accredited with the ISO 17025 norm of the Swiss office of Accreditation (SAS). Currently the LEEE-TISO solar simulator is the only accredited in Switzerland and one of the few in Europe. The accuracy of the power measurement is $\pm 2\%$ without mismatch correction and the reproducibility of the measurement shows a spread of $\pm 1\%$. The in-house availability of a solar simulator allows not only to carry out more frequent performance measurements on the test cycles examined modules but also to offer a measurement service for third parties.

In each test cycle up to 18 different PV module types can be measured at the time. Every 15 months 2 modules of each type, chosen among the on the market most frequently present, are bought anonymously. The modules are mounted on an open-rack structure tilted at 45° and south oriented. Each module operates at its maximum power point (MPP).

The I-V measurements at STC of the crystalline silicon (c-Si) modules allowed to prove the existence of a during the first hours of exposure occurring initial degradation of approximately 2%. During the first three months of exposure an additional degradation of 1% occurs, after which the PV module power generally results to remain stable for the next 12 months.

A test period of 1 year gives only a partial view about the long term stability of the power output of a PV module. The long term reliability and the mechanical degradation of PV modules is monitored on the TISO 10kW plant. It has been the first PV plant in Europe to be connected to the electrical grid and it is the plant with the longest series of monitoring data. In the years 2000-2003 it has been the object of an European research project in collaboration with the Joint Research Centre (JRC) of Ispra. The scope of the project was to determine the long term reliability of the modules (Mean Time Before Failure).

Due to the use of a pulsed solar simulator the execution of I-V measurements of thin film and some specific c-Si modules are more difficult. For this reason and also in order to allow measurements at from STC different irradiances and temperatures, an outdoor I-V measurement system with a Sun Tracker has been realised.

The energy output of each under real climatic conditions exposed module is measured and compared to the other types of modules. If the energy is normalised to the nominal power then the differences between the modules are high, reaching 20%. If the energy is instead given respect to the real stabilised power measured at STC, the differences results to be less pronounced. For c-Si modules they are in range of $\pm 4\%$. In this case the spread reflects the technological differences.

Finally a simple method for the calculation of the energy rating, the so called matrix method, has been developed. The method is based on a power matrix, which depends only from irradiance and temperature, and a meteo matrix, which describes the amount of times a climatic condition occurs in a specific place. A matrix method calculation can be easily implemented into a Excel spreadsheet. The energy prediction method turned out to be very precise and a relatively short measurement period under real climatic conditions of a few weeks resulted to be sufficient for a complete characterisation of a c-Si module.

RIASSUNTO

La centrale di collaudo LEEE-TISO è stata realizzata nei primi anni '90. Tra il 1991 e il 2003, 80 tipi di moduli hanno completato la fase di collaudo secondo la procedura messa in atto per rispondere alle esigenze di un mercato mondiale in continua espansione.

Le necessità degli utenti del fotovoltaico riguardano soprattutto:

- la qualità dei moduli fotovoltaici;
- la produzione di energia rispetto alle condizioni meteorologiche locali e al tipo di integrazione;
- l'affidabilità dei moduli sul lungo termine;

A tal fine ogni ciclo di test di moduli fotovoltaici comprende una verifica dei parametri elettrici seguita da un'esposizione in condizioni ambientali reali della durata di 15 mesi e della misura della produzione di energia. In questo periodo di tempo si può osservare i degni iniziali di tutte le tecnologie PV, seguiti da un periodo di stabilizzazione delle performance dei moduli.

Nel corso del presente progetto la centrale LEEE-TISO ha inoltre esteso le sue attività acquistando un simulatore solare di classe A per effettuare le misure della caratteristica corrente-tensione (I-V) dei moduli PV alle condizioni standard di 1000W/m^2 , 25°C e AM1.5 (STC). La misura è stata accreditata ISO 17025 secondo la norma IEC 60904-1 dal Servizio d'Accreditamento Svizzero (SAS). Attualmente il simulatore solare del LEEE-TISO è l'unico simulatore in Svizzera accreditato ISO17025 e uno dei pochi in Europa. La precisione di misura a P_m è del $\pm 2\%$, senza correzione del mismatch spettrale. I risultati delle misure di ripetibilità sono comprese in un intervallo del $\pm 1\%$. Il simulatore solare permette di effettuare delle misure più frequenti sui moduli in esame nei cicli di test, nonché di effettuare un servizio di misura su richiesta per terzi.

Ad ogni ciclo di test sono misurati fino ad un massimo di 18 diversi tipi di moduli PV. Ogni 15 mesi 2 moduli per ogni tipo sono acquistati anonimamente tra quelli più frequenti sul mercato. I moduli sono installati su una struttura aperta (open rack) inclinata a 45° verso SUD. Ogni singolo modulo lavora al suo punto di massima potenza (MPP: Maximum Power Point)..

Le misure della caratteristica I-V a STC dei moduli PV al silicio cristallino (c-Si), hanno permesso di appurare un degrado iniziale medio del 2% nelle prime ore di esposizione. Nel corso dei primi tre mesi di esposizione i moduli c-Si subiscono un'ulteriore degrado del 1%. Nel seguente 1 anno di esposizione la potenza dei moduli c-Si risulta generalmente stabile.

La stabilità sul lungo termine della potenza può essere verificata solo parzialmente nel corso di un anno di test. L'affidabilità sul lungo periodo dei moduli PV e i meccanismi di degrado meccanico possiamo però monitorarli sull'impianto fotovoltaico TISO 10kW. L'impianto TISO 10kW è stato il primo impianto d'Europa ad essere collegato alla rete pubblica, ed è tuttora l'impianto con la più lunga sequenza di monitoraggio. Negli anni 2000-2003 è stato l'oggetto di un progetto di ricerca europeo, in collaborazione con il JRC di Ispra, volto a determinare l'affidabilità dei moduli sul lungo termine (Mean Time Before Failure).

Le misure I-V dei moduli thin film e di alcuni moduli c-Si sono più problematiche da effettuare su un simulatore solare a flash. Per questo motivo e anche per permettere misure a condizioni di irraggiamento e temperatura differenti da quelle a STC, è stato realizzato un sistema di misura outdoor della caratteristica I-V abbinato ad un sistema di inseguimento del sole (Sun Tracker).

L'energia dei moduli esposti in condizioni ambientali reali è misurata e confrontata con quella degli altri tipi di moduli. Se l'energia è normalizzata in funzione della potenza nominale installata le differenze sono elevate e possono raggiungere il 20%. Se invece l'energia è normalizzata rispetto alla potenza reale stabilizzata misurata a STC, le differenze risultano minori e per i moduli c-Si sono mediamente comprese in un range del $\pm 4\%$. In questo caso le variazioni riflettono le differenze tecnologiche.

Infine è stato sviluppato un metodo semplice per il calcolo della resa energetica, denominato metodo delle matrici, basato sulle matrici di potenza riferite solo all'irraggiamento e alla temperatura, e su matrici di eventi climatici di un dato luogo. Il metodo delle matrici è utilizzabile con un semplice foglio di calcolo elettronico (stile Excel). Il metodo si è rivelato molto preciso ed un periodo di misura in condizioni ambientali reali ridotto a poche settimane può essere sufficiente per una caratterizzazione completa di un modulo al silicio cristallino.

1 INTRODUZIONE

Il mercato mondiale fotovoltaico è in continua espansione: nel corso degli ultimi 7 anni (1997-2003) la produzione mondiale di moduli fotovoltaici è cresciuta del 35% all'anno (globalmente del 500%). In queste condizioni di rapida crescita del mercato risulta particolarmente importante verificare la qualità dei prodotti.

A partire dagli anni '90, gli impianti collegati alla rete pubblica sono aumentati, superando per potenza installata quelli autonomi (non collegati alla rete). La rete viene utilizzata come accumulatore per immettere l'energia eccedente e venderla all'azienda elettrica locale. Il prezzo di vendita dell'energia elettrica di origine solare è aumentato grazie ad appositi programmi di incentivazione, in particolare in Giappone e in Germania. Le borse solari (vedi l'esempio svizzero) hanno permesso di installare impianti PV anche dove il prezzo normale d'acquisto non è interessante da un punto di vista economico.

Il costo dei moduli incide in modo preponderante sul costo dell'intero impianto PV e quindi sul costo dell'energia prodotta. Tuttavia sono importanti anche altri fattori:

- il rispetto dei valori di potenza dichiarati dal fabbricante,
- il comportamento elettrico nelle condizioni climatiche locali e la produzione di energia,
- la stabilità nel corso del tempo,
- la durata di vita dei moduli,

Oltre a questi fattori legati alle caratteristiche del modulo, nella progettazione di un impianto PV sono importanti anche altri fattori legati alle condizioni locali (ubicazione, clima, ecc.) e al dimensionamento degli ondulatori.

Il progettista di impianti fotovoltaici non dispone dei mezzi necessari per verificare e confrontare le varie caratteristiche del sempre maggior numero di moduli presenti sul mercato.

La centrale di collaudo LEEE-TISO si è prefissa lo scopo di fornire delle informazioni affidabili sugli aspetti di qualità, di affidabilità e di produzione di energia dei moduli PV.

La centrale di collaudo per componenti fotovoltaici, creata nel 1991, ha ripreso le esperienze maturate negli anni '80 tra cui la realizzazione del primo impianto collegato alla rete d'Europa con moduli al silicio monocristallino (sc-Si) nel 1982 e quella di un impianto con i primi moduli al silicio amorfo nel 1988.

Nel corso dei precedenti progetti è stata realizzata una struttura per il collaudo outdoor di moduli PV. Gli stand di prova sono ubicati sul tetto della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI) a Lugano-Trevano.

Il progetto "Qualità e resa energetica di moduli ed impianti PV, centrale LEEE-TISO, periodo VI: 2000-2002", ha subito un prolungamento fino al 2003 a causa dei cambiamenti organizzativi avvenuti all'interno della scuola nonché dell'aumento dei progetti di ricerca che hanno influenzato lo svolgimento delle attività del laboratorio.

La verifica della qualità dei moduli comprende il confronto delle dichiarazioni dei fabbricanti di moduli con le misure reali delle caratteristiche elettriche. L'esposizione alle condizioni ambientali reali permette di osservare il comportamento dei moduli a diverse condizioni climatiche e la loro stabilità elettrica, nonché effettuare un confronto della loro resa energetica. In totale 80 tipi di moduli, scelti fra quelli più presenti sul mercato, hanno completato o stanno completando la fase di collaudo (a partire dal 1991 fino al 2003) di cui ben 41 nel 6° periodo del progetto.

La misura delle caratteristiche elettriche dei moduli PV veniva finora effettuata presso i laboratori ESTI del JRC di Ispra (I). Dal 2000 il LEEE-TISO si è dotato di un simulatore solare di classe A e nel corso del 2001 la misura I-V dei moduli al silicio cristallino è stata accreditata ISO 17025 secondo la norma IEC 61904-1. L'importante acquisizione ha permesso di modificare la procedura di collaudo a medio termine in modo sostanziale.

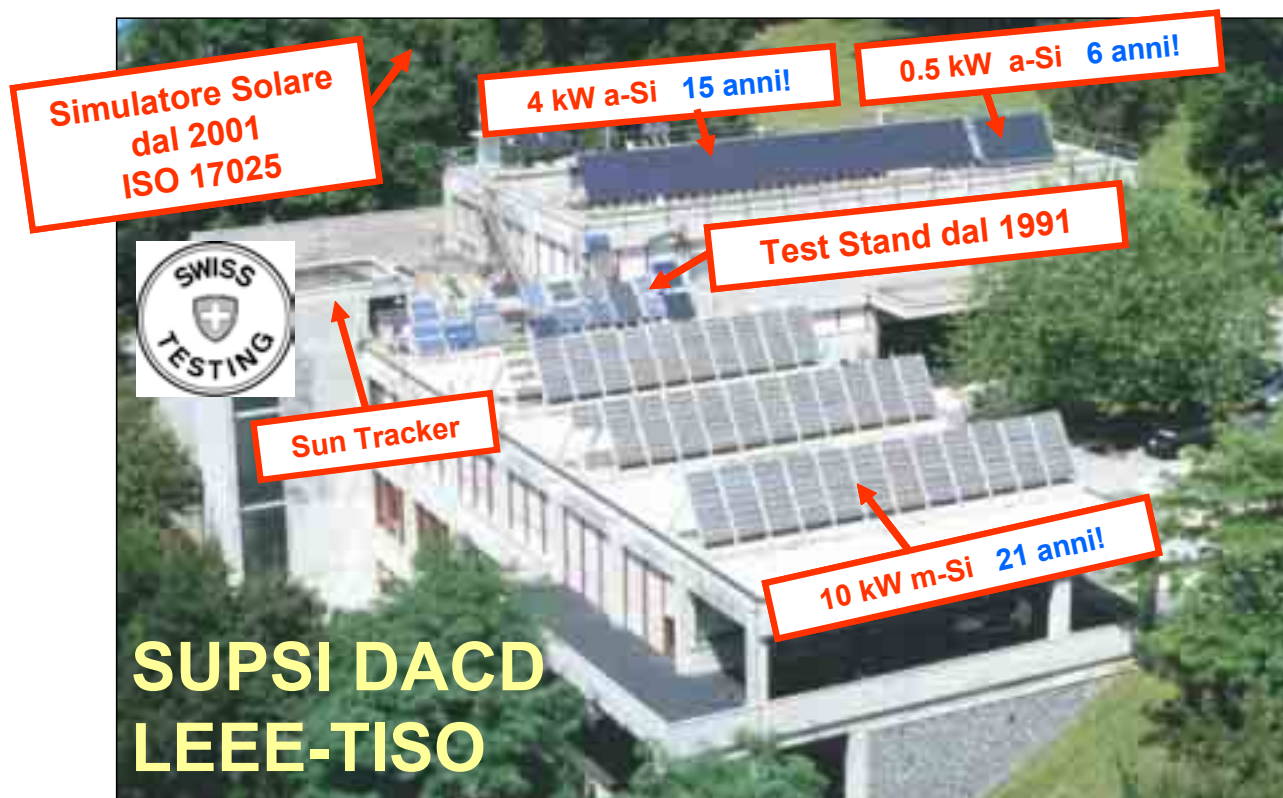


Figura 1: Le installazioni della Centrale di collaudo LEEE-TISO: gli stand di test outdoor, il simulatore solare e gli impianti collegati alla rete.

Le installazioni della Centrale di collaudo comprendono:

1. Simulatore solare per le misure indoor.
2. Sistema per le misure outdoor a corto termine (I-V tracer e Sun Tracker).
3. Stand di test per le misure di collaudo outdoor a medio termine (15 mesi).
4. Impianti collegati alla rete monitorati per verificare l'affidabilità a lungo termine dei moduli.

Le attività principali della Centrale di collaudo sono elencate di seguito e costituiscono i capitoli principali del presente rapporto finale:

1. Misure indoor.
2. Misure outdoor a corto termine.
3. Misure outdoor a medio termine con:
 - a. Misure di potenza reale dei moduli.
 - b. Rispetto delle garanzie dei moduli.
 - c. Osservazione del comportamento dei moduli in condizioni ambientali reali
 - d. Misura della resa energetica.
 - e. Metodi di pronostico della resa energetica.
4. Verifiche a lungo termine outdoor.

Inoltre un capitolo è dedicato alla “divulgazione delle informazioni” e alla “formazione”. Seppure non completamente integrate nel presente progetto, costituiscono un elemento importante alla diffusione delle conoscenze acquisite.

2 MISURE INDOOR

2.1 Abstract (in English)

The ISO 17025 accreditation of c-Si module performance measurements at standard test conditions allows for the execution of a series of systematic tests (I-V @STC) to verify module quality, so enabling the LEEE to support module manufacturers and final consumers.

Summarising:

- The new class A pulsed sun simulator has been working for over three years.
- The c-Si module performance measurements, in accordance with the International Standard IEC 60904-9, have been ISO 17025 accredited since 2001.
- Measurement accuracy and repeatability is periodically verified through the execution of comparison measurements and Round Robin tests. Results show a good system stability.
- The measurement uncertainties guaranteed by the LEEE-TISO (see frame below) are comparable to those of the main research and service laboratories.

**Measurements uncertainties of c-Si
module I-V characteristic:**

current (I): $\pm 1.4\%$
voltage (V): $\pm 1.0\%$
power (Pmax): $\pm 2.0\%$

- In the period 2000-2003, 560 measurements for third-parties were performed; 377 of them in the final year.
- About 2000 measurements are performed every year, taking into consideration tests for internal research, third-party work and comparison/calibration verifications,.

Within the next project, laboratory offer will be increased by:

- Setting up and validation (through comparison with JRC, Ispra) of an accredited (ISO 17025) temperature depending I-V measurement (at reference irradiance) for c-Si modules. This test will be performed by means of a specially developed thermostatic chamber.
- Setting up and validation of an irradiance depending I-V measurement for c-Si modules.
- Validation of the I-V measurements, with pulsed sun simulator, of thin-film modules (a-Si, CIGS and CdTe), correlated with outdoor analysis.

2.2 Introduzione

Nel corso del 2000 il LEEE ha acquistato un simulatore solare ad impulso (PASAN III) di classe A (IEC 60904-09) con il quale è possibile effettuare misurazioni sistematiche della potenza dei moduli @STC.

Le misure @STC venivano finora effettuate presso il JRC di Ispra.

Questa apparecchiatura, installata in un locale ("Dark-room") appositamente ristrutturato, ha permesso di:

- Ottenere informazioni più dettagliate sul degrado della potenza @ STC ed un rating (E/P_{STC} , PR) più preciso (misure più frequenti);
- Effettuare esperimenti indoor in relazione all'energy-rating;
- Offrire prestazioni di servizio a terzi a prezzi interessanti per la misura su campioni di moduli nuovi o prelevati da impianti esistenti.

Durante l'anno 2000 si è proceduto alla verifica del buon funzionamento del simulatore solare e alle necessarie modifiche di adattamento del software di gestione delle apparecchiature.

2.3 Certificazione ISO 17025

La preparazione per la certificazione ISO 17025 ha comportato una preparazione dettagliata, sia per quanto riguarda la descrizione delle procedure di test dove è necessario garantire la riconducibilità al SI di misura e quindi della definizione delle direttive del sistema di qualità, sia per quanto riguarda la gestione dei documenti secondo direttive amministrative rigorose.

Nel corso del mese di febbraio 2001 si è tenuto l'audit per la certificazione della misura della caratteristica corrente-tensione a 1000 W/m² e 25°C (IEC 60904-1) con il simulatore solare ad impulso. A partire dal 26 giugno 2001 la misura è accreditata (ISO 17025; numero d'accreditamento STS 309) dal Servizio d'Accreditamento Svizzero (SAS).

Per il mantenimento dell'accreditamento, oltre alle regolari tarature delle apparecchiature (cella di riferimento, sensori di temperatura, carica elettronica, ecc.), vengono effettuate delle misure di ripetibilità, ogni settimana, su 3 moduli di riferimento e delle misure di confronto con altri laboratorio (ESTI e ECN).

Inoltre la SAS effettua degli audit per verificare il corretto funzionamento del laboratorio. Questi controlli (10.6.2002 e 22.05.2003), che inizialmente hanno un periodicità annua, hanno avuto un esito positivo.

2.4 Caratteristiche Simulatore Solare

Il simulatore solare permette di determinare la caratteristica corrente-tensione di dispositivi fotovoltaici usando un simulatore solare a impulso come sorgente di luce e un carico elettronico. Questo carico impone al dispositivo PV (fotovoltaico) una variazione lineare di tensione durante l'intervallo utile del flash. Nel corso di questa variazione la tensione e la corrente del dispositivo vengono registrati su supporto informatico. L'intensità dell'irraggiamento della lampada viene misurata e registrata tramite una cella di riferimento.

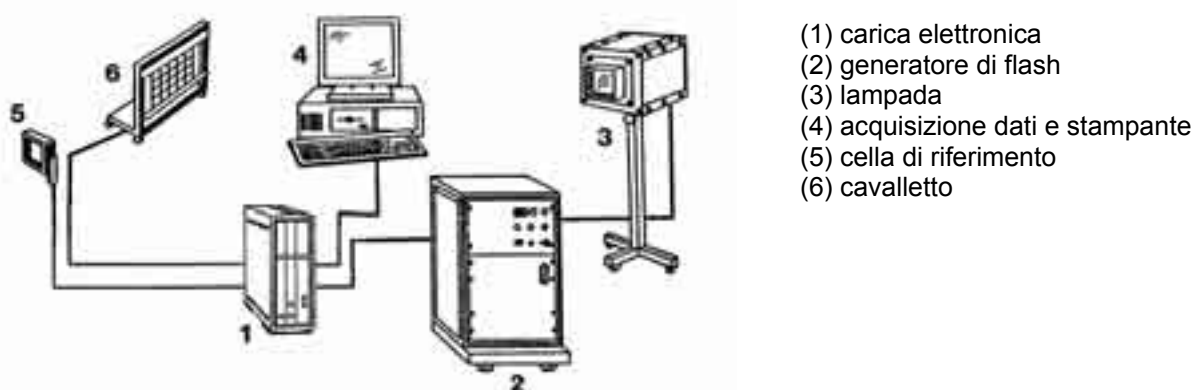


Figura 2: Schema del simulatore solare

Le caratteristiche della carica elettronica sono:

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| - Tensione (intervalli) | 0,7 / 1 / 3 / 10 / 30 / 100 / 300 V |
| - Corrente (intervalli) | 0,1 / 0,3 / 1 / 3 / 10 / 30 A |
| - Potenza massima misurabile | 1'000 W |

- Intervallo di sensibilità per la cella di riferimento 0.1 - 300 mV in step di 0.1 mV
- Irraggiamento d'inizio della scansione 0,2 - 1.2 Sun (kW/m^2), selezionabile via PC
- Intervallo di temperatura -100 to +100 °C, sensore PT1000
- Coefficiente di temperatura < +/- 200 ppm /°C
- Risoluzione D/A e A/D 12 bits (4096 punti)
- Velocità massima d'acquisizione 10 μs / measurement
- Numero massimo di punti misurati 255 (per curve), 100 pts as standard

Le caratteristiche del generatore di flash sono:

- Norma applicata IEC 60904-9
- Classe A
- Durata flash (periodo misurato) 2 ms min.
- Stabilità della luce +/- 2% max.
- Intensità della luce >1 kW/m^2 @ 8 m & AM1.5
- Uniformità della luce +/- 2 % @ 8 m. & Circle diam. 2,5 m.
- Tempo di carica < 1 min.

La realizzazione della camera oscura (dark room) ha comportato l'ampliamento e la ristrutturazione di un locale situato sotto i laboratori LTS. Il locale è profondo 11 m e largo 6.5 m. Le pareti, il soffitto e il pavimento sono pitturati o ricoperti di materiale nero, non riflettente, per evitare riflessioni non volute. Il locale dispone di due diaframmi, composti da tendaggi appositi, per bloccare ogni ulteriore riflessione.

Infine, un apposito armadio termostatico e ventilato, permette di portare in breve tempo la temperatura dei moduli, alla temperatura desiderata prima delle misure in condizioni di temperatura standard (25°C). L'estensione delle possibilità di misura ad altre temperature ha invece comportato l'acquisto di un sistema differente di armadio termostatico (vedi cap. 2.11).

2.5 Misure I-V di confronto e calibrazioni a STC

Al fine di garantire la massima affidabilità delle misure effettuate con il simulatore solare, periodicamente vengono effettuate delle misure di confronto @STC (1000 W/m^2 e 25°C) e Round Robin test con altri laboratori.

In particolare si eseguono, semestralmente, misure di rendimento con il laboratorio ESTI (JRC, Ispra) su tre moduli di confronto custoditi, durante l'anno, nella camera oscura del LEEE-TISO.

Sono state definite differenze limite per quanto riguarda le caratteristiche misurate (ΔI_{sc} : $\pm 2.2\%$, ΔV_{oc} : $\pm 1.8\%$, ΔP_m : $\pm 3.1\%$), oltre le quali devono essere applicate direttive stabilite nell'ambito del sistema qualità (certificazione ISO 17025). Da dicembre 2000 ad oggi sono state effettuate cinque misure di confronto. Le differenze medie dei tre moduli di riferimento sono riportate nella Tabella 1.

Data	ΔP_{max_medio} (%)	ΔI_{sc_medio} (%)	ΔV_{oc_medio} (%)
12.00	-0.4	-0.5	-0.8
06.01	-0.1	0.6	-1.0
12.01	0.6	1.3	-1.5
06.02	-0.6	0.2	-1.0
02.03	0.0	0.6	-1.2
Δ_{medio} (%)	-0.1	0.4	-1.1

Tabella 1: differenze medie percentuali dei 3 moduli di riferimento risultate dalle misure di confronto tra il LEEE-TISO e ESTI.

Le misure riportate nella Tabella 1 mostrano una differenza media limitata in P_{max} e I_{sc} , mentre in V_{oc} la differenza è proporzionalmente più ampia. I valori sono comunque sempre risultati minori rispetto alle differenze limite definite.

In aggiunta alla verifica sopra descritta, una volta all'anno si esegue un Round Robin test tra il LEEE-TISO, il laboratorio ESTI (JRC, Ispra) ed il centro di ricerca ECN (Energy Research Centre of the Netherlands); la caratteristica corrente-tensione (1000 W/m^2 e 25°C) di un unico modulo di riferimento (Kyocera LA361K51S) viene misurata da tutti i laboratori. Anche in questo caso si sono definiti limiti di tolleranza (ΔI_{sc} : $\pm 3.0\%$, ΔV_{oc} : $\pm 2.5\%$, ΔP_m : $\pm 3.5\%$) fino ad ora rispettati (Tabella 2).

Anno	Laboratori	ΔP_{max} (%)	ΔI_{sc} (%)	ΔV_{oc} (%)
2001	TISO-ESTI	-1.3	-2.9	1.4
	TISO-ECN	-0.7	-2.5	2.3
2002	TISO-ESTI	-0.4	-1.3	0.5
	TISO-ECN	-0.1	-1.7	2.0

Tabella 2: differenze percentuali risultate dal Round Robin Test tra il LEEE-TISO, ESTI e ECN.

2.6 Taratura strumenti

La taratura ed il controllo della strumentazione sono fondamentali nella gestione del laboratorio di misura con Simulatore Solare e dell'accreditamento ISO17025.

La carica elettronica ed il generatore di flash vengono tarati annualmente dalla ditta costruttrice (Belval SA), così come le celle di riferimento (ESTI, JRC Ispra - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB Braunschweig), Deutschland) e la relativa resistenza di shunt (Belval SA). I sensori di temperatura (3 RTD del tipo PT1000) vengono acquistati ogni anno con certificato di taratura e controllati dal LEEE-TISO prima della messa in funzione, dopo sei mesi ed a fine utilizzo.

L'elemento principale del sistema è la cella di riferimento. Il fabbricante del simulatore solare ha fornito, assieme alla strumentazione, una cella di riferimento. Il LEEE-TISO ha però optato per una cella secondo lo standard del WPVS (World PV Scale). La cella - della ditta PRC Krochmann GmbH - è del tipo floating zone sc-Si, di provata linearità e stabilità nel tempo.

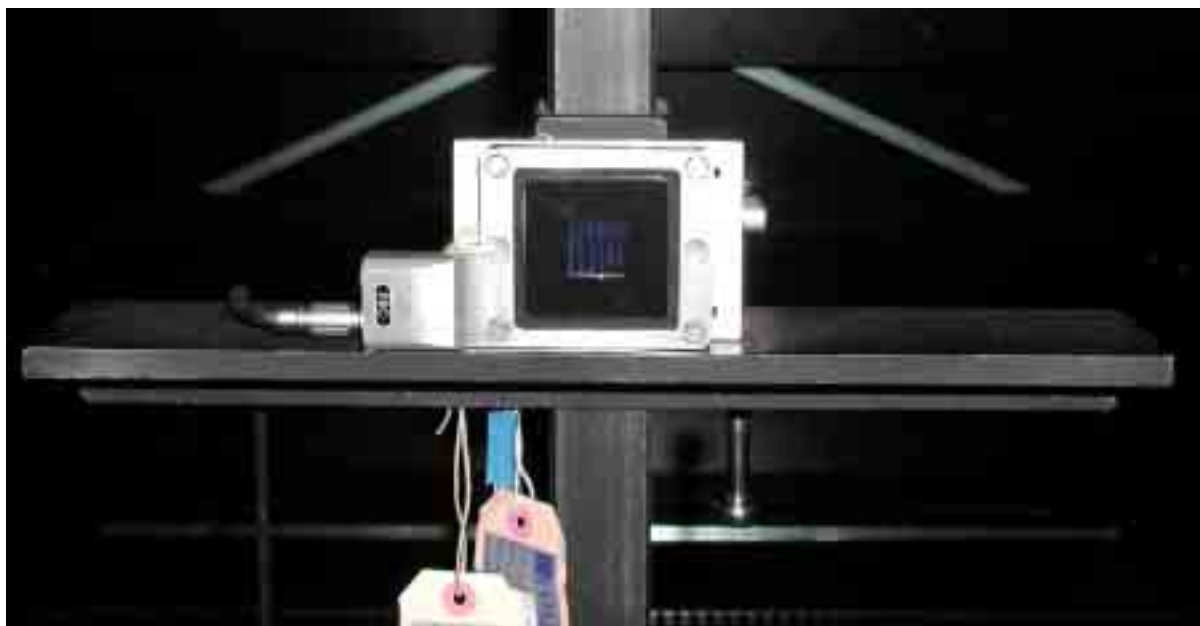


Figura 3: Cella di riferimento sc-Si floating zone, tipo PRC (Krochmann GmbH), utilizzata come riferimento per le misure indoor

La calibrazione è stata effettuata inizialmente unicamente al JRC di Ispra. In seguito all'adozione di un nuovo metodo di analisi e calcolo dell'errore secondo la Norma Internazionale ISO 5725, si è verificato un incremento dell'incertezza dichiarata dal JRC che, di conseguenza, ha comportato una variazione dell'errore

dichiarato dal LEEE-TISO. Per ottenere una maggior precisione di misura la cella di riferimento è stata quindi fatta calibrare dal PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, (PTB Braunschweig), Deutschland) con analisi della risposta spettrale. L'incertezza di misura ha potuto essere mantenuta senza nessuna modifica al fattore di calibrazione della cella di riferimento. Ciò comprova inoltre la riproducibilità delle misure di riferimento della cella effettuate sia all'ESTI di Ispra che al PTB Braunschweig.

Anche il deterioramento della lampada del simulatore può influire sul risultato della prova (variazione dello spettro). Per ovviare a tale inconveniente, periodicamente si verifica l'eventuale formazione di patina bianca sul bulbo e, in ogni caso, è prevista la sostituzione della lampada ogni 8000 flash. Annualmente si effettuano in media 2000 flash.

2.7 Calcolo dell'incertezza di misura

Nonostante l'esecuzione di periodiche tarature e di misure di confronto con altri laboratori, esistono fattori non totalmente controllabili che possono influenzare i risultati delle prove; ne consegue quindi la necessità di valutare e quantificare l'incertezza del risultato, o errore.

Nell'ambito del sistema di qualità è stato necessario definire una procedura per il calcolo di tale errore (Allegato: “I-V characteristic measurements with Pasan Sun Simulator III: uncertainty calculation”).

Tale procedura fa riferimento principalmente alla Norma Internazionale ISO 5725 “Accuracy (trueness and precision) of measurement method and result”, che definisce principi e metodi per la determinazione dell'accuratezza (esattezza e fedeltà) di una misura. In pratica, nel calcolo dell'incertezza di un metodo di misura vengono considerati tutti i componenti del sistema (in questo caso acquisizione dati, cella di riferimento, sensori di temperatura, ecc.) che potrebbero alterare i risultati (I_{sc} , V_{oc} , P_{max}).

La COMBINED STANDARD UNCERTAINTY (u_c) rappresenta la stima della deviazione standard di un risultato e si ottiene dalla combinazione delle standard uncertainty dei singoli componenti (LAW OF PROPAGATION OF UNCERTAINTY o ROOT-SUM-OF-SQUARE METHOD). L'incertezza dichiarata con il risultato finale si definisce EXPANDED COMBINED UNCERTAINTY (U) e si ottiene moltiplicando u_c per un COVERAGE FACTOR (k) che varia da 2 a 3 (in questo caso $k = 2$).

Per le misure di servizio vengono quindi applicate alle misure I-V effettuate le seguenti precisioni di misura:

<p>Incertezze di misura della caratteristica I-V di moduli PV al silicio cristallino:</p> <p>corrente (I): $\pm 1.4\%$</p> <p>tensione (V): $\pm 1.0\%$</p> <p>potenza (P_{max}): $\pm 2.0\%$</p>
--

2.8 Misure I-V dirette, inverse e Multiflash

L'effetto capacitivo di alcuni tipi di celle e/o la presenza di resistenze di serie, possono “alterare” il risultato della misura diretta corrente-tensione effettuata con un simulatore solare ad impulso.

Per l'analisi di questo fenomeno, nel 2001 è stato acquistato un software che permette di misurare la caratteristica elettrica di dispositivi PV attraverso l'esecuzione di flashes consecutivi a diverse tensioni imposte dall'operatore.

Esempi di misure effettuate con il metodo multiflash sono rappresentati in Figura 4 e Figura 5 dove viene fatto il confronto con la caratteristiche I-V dirette (normale misura a STC).

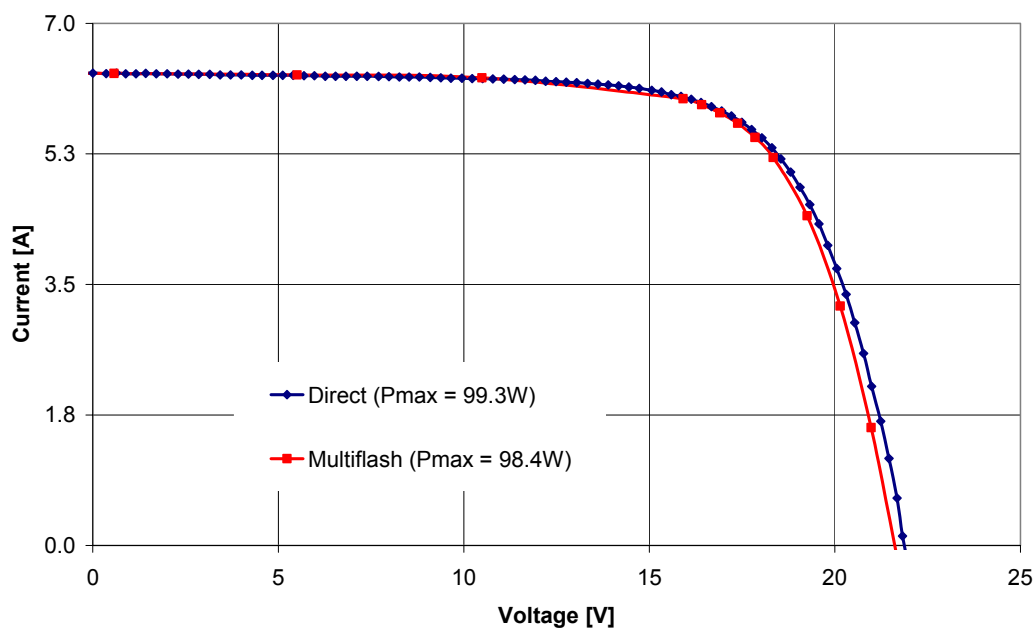


Figura 4: confronto delle caratteristiche I-V di un modulo PV c-Si ottenute tramite misura diretta e metodo multiflash.

Nel caso illustrato nella **Figura 4** la differenza nel punto di massima potenza non è rilevante ($\Delta P_{max} = 0.9\%$) e rientra nella precisione del sistema.

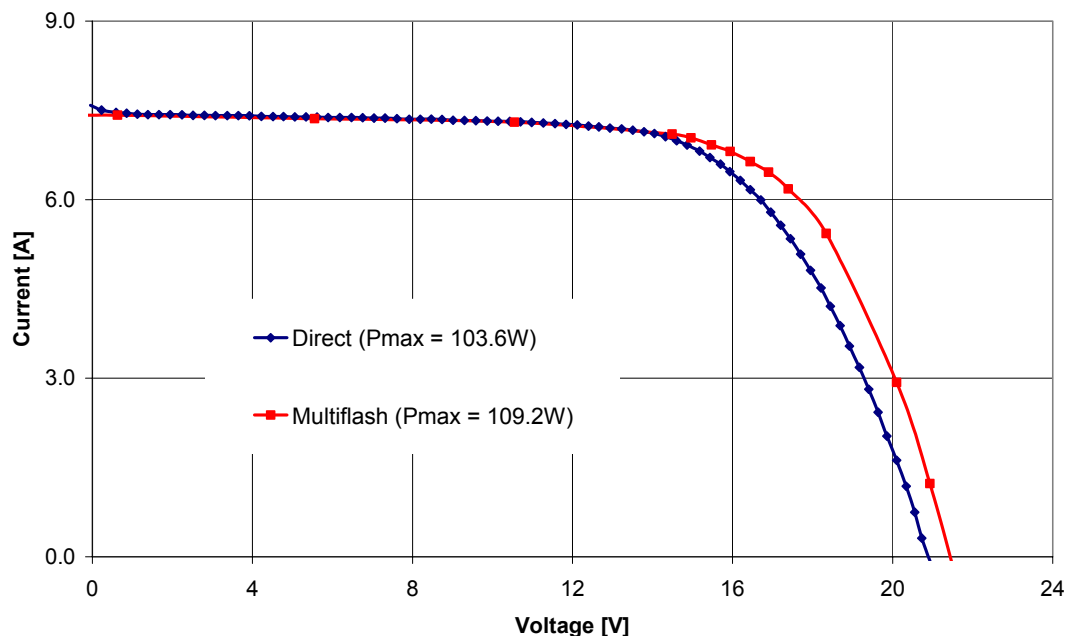


Figura 5: confronto delle caratteristiche I-V di un modulo PV c-Si ottenute tramite misura diretta e metodo multiflash. $\Delta P_{max} = -5.1\%$ (direct vs. multiflash).

Nel caso illustrato nella **Figura 5** l'effetto capacitivo è significativo e il metodo di misura diretto non può essere utilizzato.

Per garantire la massima correttezza dei risultati pubblicati o rilasciati ai committenti, per ogni nuovo tipo di dispositivo PV testato viene eseguita, oltre alla misura diretta corrente-tensione, anche quella multiflash.

Per quanto riguarda i moduli PV dei cicli 7, 8 e 9, solo per tre tipi si sono ottenute differenti caratteristiche elettriche con i due metodi di misura: Sunslates (Atlantis), A-60 e A-120P5 (Atersa). Nell'ambito delle misure di servizio, differenze rilevanti si sono riscontrate per i dispositivi Atersa A-120P5 ($\Delta P_{\text{max_multi_direct}} = 5.7\%$) e Astropower AP-130 ($\Delta P_{\text{max_multi_direct}} = 4.0\%$).

Lo scarto tra la misura I-V diretta e la misura multflash di tutti gli altri moduli analizzati rientra nei limiti di precisione delle misure.

2.9 Misure I-V di ripetibilità a STC

La stabilità del sistema di misura dipende da molteplici fattori riferiti ai suoi singoli componenti. In particolare la misura a STC permette una variazione della temperatura $T = 25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ che influenza il risultato finale. Per verificare la stabilità globale del simulatore solare vengono effettuate delle misure settimanali della caratteristica I-V su 3 dispositivi di riferimento (Figura 6).

I valori limite di ripetibilità tollerati, riferiti alle deviazioni standard medie dei risultati ottenuti e non alla variazione percentuale, come rappresentato in Figura 6, sono:

Valori limite di ripetibilità:

P_{max} :	$\pm 1.1\%$
I_{sc} :	$\pm 0.8\%$
V_{oc} :	$\pm 0.8\%$

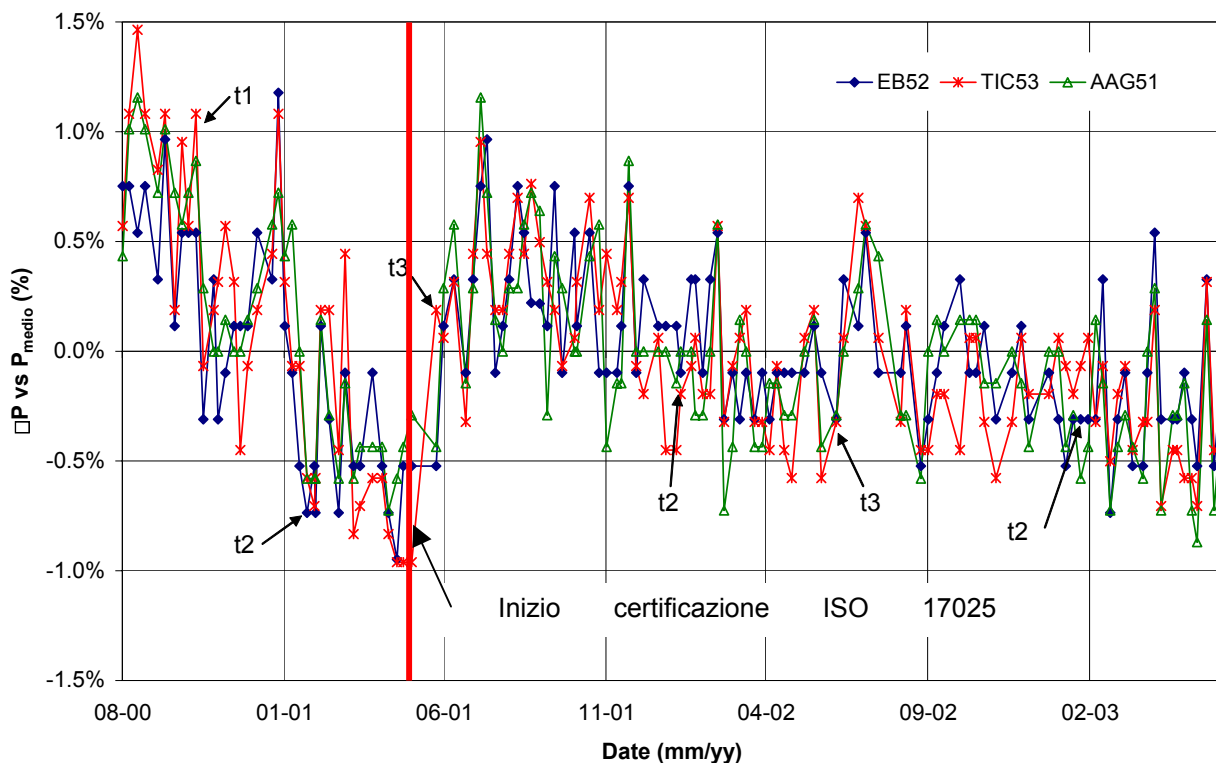


Figura 6: misure di ripetibilità con Simulatore Solare LEEE-TISO. Variazione percentuale (rispetto alla media) della potenza di tre moduli di riferimento.

Nella **Figura 6** è riportata la variazione percentuale delle misure di riferimento. Le calibrazioni delle apparecchiature sono avvenute in t2 per la corrente e la tensione, e in t3 per la cella di riferimento. In t1 è stata sostituita la lampada. La linea rossa verticale indica la data di inizio della certificazione. Il primo valore di t3 (maggio 2001) ha portato ad un cambiamento del valore di riferimento.

Le variazioni della potenza misurata si situano all'interno dell'intervallo dei limiti di ripetibilità ammessi del $\pm 1.1\%$.

2.10 Misure I-V con variazioni di temperatura e irraggiamento

In aggiunta alla misura corrente-tensione @STC è fondamentale conoscere il comportamento dei moduli PV a diverse temperature (coefficienti α e β) ed irraggiamenti. Questo tipo di analisi viene già effettuata dal

LEEE-TISO attraverso i dati ottenuti dal monitoraggio in condizioni reali (capitoli 3 e 4 del presente rapporto) e dall'esecuzione di misure I-V outdoor (I-V Tracer Solar Systeme Schutt PVCT, capitolo 3).

Sono state eseguite misure indoor per verificare che tale determinazione fosse possibile anche con il simulatore solare (Figura 7 e Figura 8).

Per quanto riguarda la misura a diverse temperature, i moduli sono stati scaldati in forni presenti in laboratori adiacenti la camera oscura. Dopo essere stati riscaldati ad una temperatura di 65°, si è misurata la caratteristica corrente-tensione ad intervalli di 5°C in fase di raffreddamento.

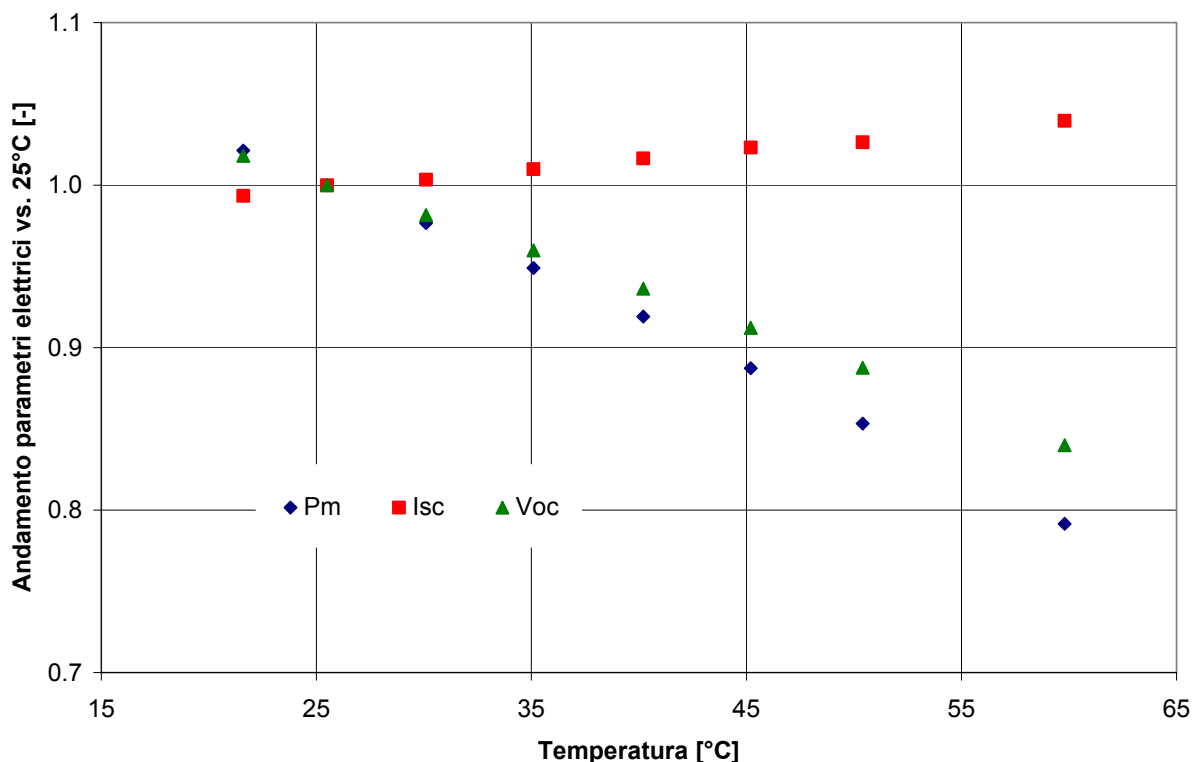


Figura 7: andamento dei parametri elettrici (corrente, tensione e potenza) di un modulo sc-Si in funzione della temperatura e a 1000W/m².

Il metodo è poco preciso, perché non permette di eseguire le misure con modulo a temperatura stabile ed uniforme, soprattutto ad alte temperature (raffreddamento rapido), infatti si sono ottenuti coefficienti di temperatura relativamente alti ($\beta_{\text{cella}} = 2.5\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{\text{cella}} = 35\mu\text{A}/\text{cm}^2/^{\circ}\text{C}$). Inoltre la misura della temperatura in regime dinamico, effettuata con un sensore PT1000 posizionato sul retro del modulo (T_{bom}), non permette di valutare in modo sufficientemente preciso la temperatura della cella (T_{c}). Per garantire una maggior uniformità e stabilità della temperatura del modulo, e quindi risultati più precisi, è stato acquistato un armadio termostatico (2.11 Armadio termostatico). Ciò permetterà di fornire questo servizio a terzi.

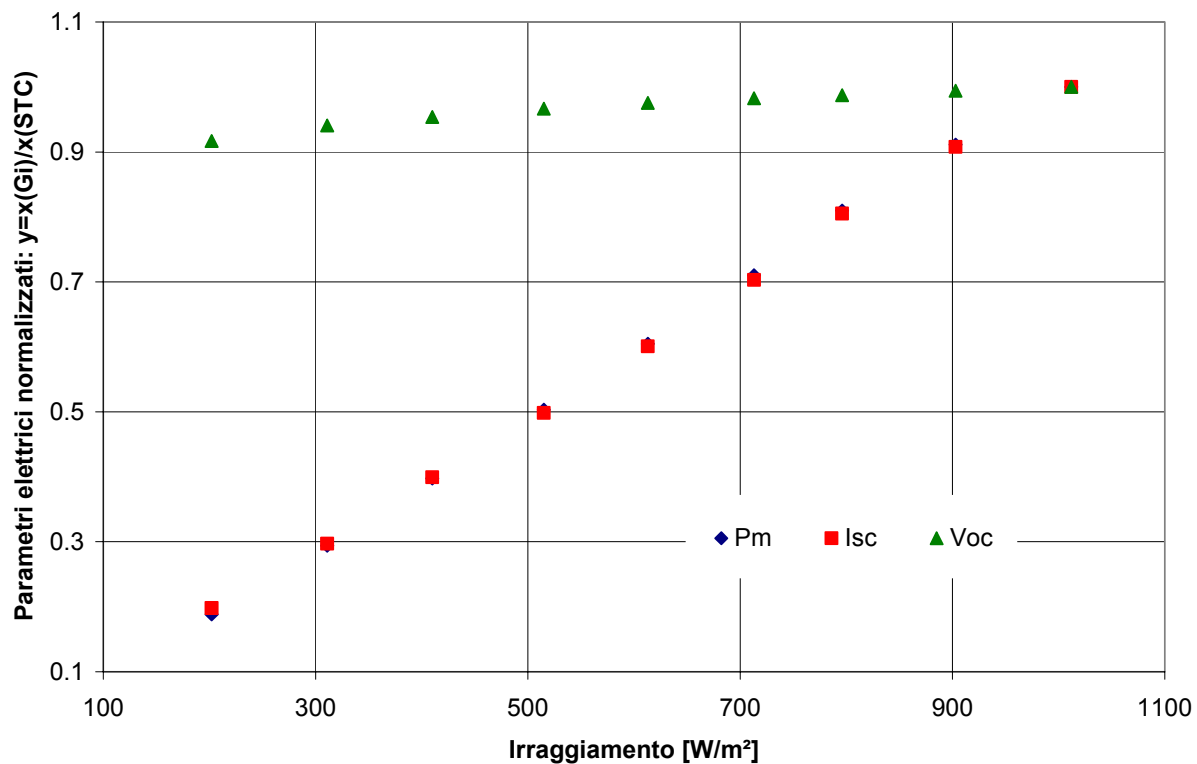


Figura 8: andamento dei parametri elettrici (corrente, tensione e potenza) di un modulo cs-Si in funzione dell' irraggiamento incidente. Dove X è il parametro elettrico corrispondente (Voc, Isc o Pm).

L'irraggiamento è stato modificato mediante la variazione della potenza del generatore del flash. Ciò però comporta una possibile variazione dello spettro a bassi irraggiamenti. Tuttavia, dal grafico in Figura 8, si nota un andamento lineare. Un'ulteriore verifica dovrà essere effettuata mediante misure comparate outdoor, a basso irraggiamento.

2.11 Armadio termostatico

Per poter effettuare le misure della caratteristica corrente-tensione a diverse temperature si è deciso di equipaggiarsi di un armadio termostatico sviluppato appositamente.

L'armadio termostattizzato per le misure dei moduli in condizioni climatiche indoor differenti da quelle a 25°C standard è stato comandato ma non è stato ancora installato per una serie di ritardi della ditta fornitrice.

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche principali dell'armadio:

Dimensioni esterne (LxPxH) [mm]	2000 x 800 x 2000
Dimensioni interne utili del forno (LxPxH) [mm]	1900 x 500 x 1400
Volume utile della camera [litri]	1330
Porta ad un battente con cristallo - apertura netta [mm]	1900 x 1400
Cristallo porta float chiaro dimensioni [mm]	1800 x 1300 x 6
Regolatore/Programmatore a microprocessore [linea seriale]	RS232
Caratteristiche ottiche del cristallo porta (vedi grafico) [nm]	Tra i 300 e i 1300
Range di temperatura [C°]	Da + 5 K° sopra T.A. ÷ + 70 C°
Uniformità di temp. nello spazio in condiz. di stabilizz. [K°]	±1
Costanza temperatura nel tempo [K°]	±0,5
Ventilazione forzata orizzontale portata [m³/h]	600
Ricambio aria con camino e serranda automatica [m³/h]	Max 50
Materiale del vano di prova [acciaio]	Verniciato nero opaco
Isolamento pareti con pannelli in laminato plastico [mm]	Sandwich da 30
Potenza riscaldamento [kW]	0,6
Motori ventilatori per ricircolo aria N° 2 [kW]	0,4
Elettroventilatore per ricambio aria [kW]	0,2
Potenza installata [kW]	1,2
Alimentazione da rete [Volt/Hertz]	220 +6% /-10% 1ph+T / 50-60
Intensità corrente [Amper]	6
Rumorosità a 1 metro dal fronte forno [dB-A]	50
Struttura interna supporto pannelli in prova regolabile [mm]	Da min. 200 a max 1200
Ruote supporto apparecchiatura completa [N°]	2 fisse e 2 fisse bloccabili
Peso (stima approssimativa) [Kg]	180

Tabella 3: caratteristiche dell'armadio termostatico per misure indoor con simulatore solare.

2.12 Misure per terzi

Il numero di misure indoor con il simulatore solare per servizi esterni è ancora esiguo rispetto al numero di misure effettuate per la ricerca e per il controllo di funzionalità e calibrazione del simulatore. Tuttavia esso è in continua crescita.

In totale, nel periodo 2001-2003, sono state effettuate 560 misure per terzi, incluse le misure di controllo commissionate dal Cantone Ticino nell'ambito del programma di sussidio di impianti PV in Ticino.

Le attività di ricerca hanno permesso di mettere a punto dei servizi di qualità che sono sempre più richiesti dai tecnici svizzeri ed esteri del ramo. Il seguente grafico mostra il numero di moduli misurati con il simulatore solare a partire dalla sua messa in funzione come servizio esterno (2001).

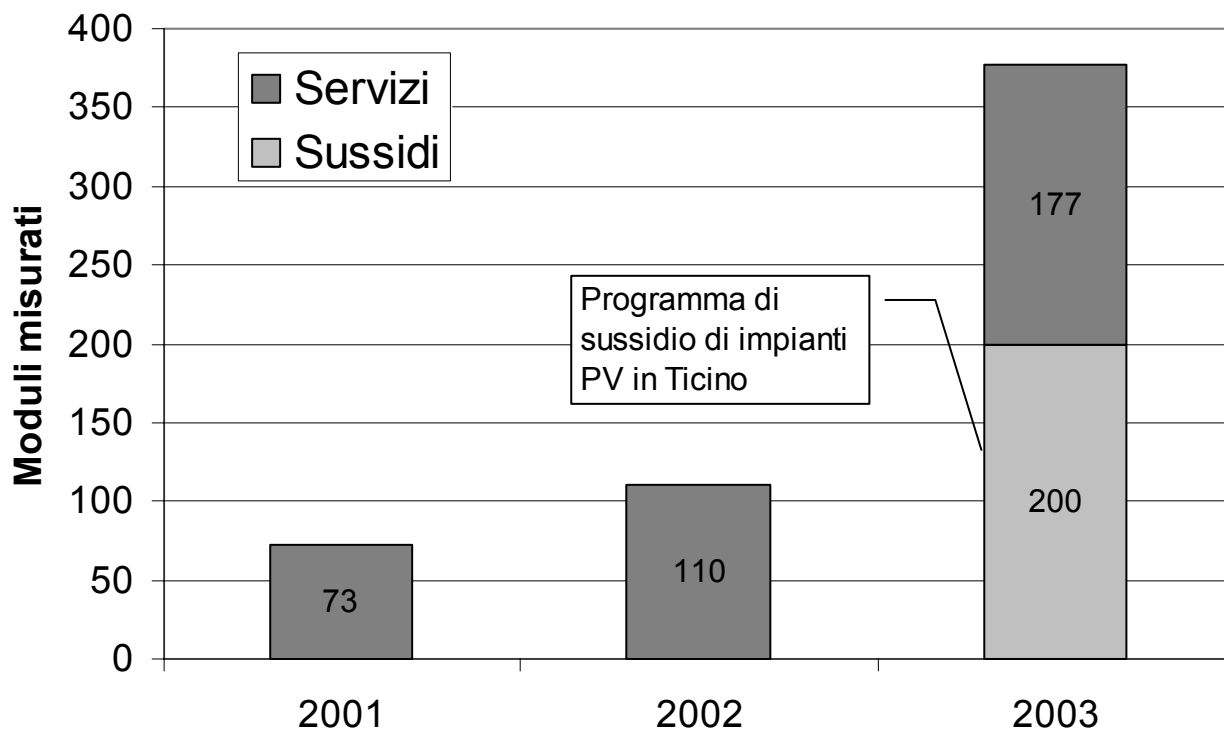


Figura 9: Misure I-V effettuate annualmente per terzi con il simulatore solare.

I servizi – la cui gamma con il nuovo progetto di ricerca si propone di ampliare – permettono di migliorare la qualità degli impianti installati. A tal riguardo si citano gli impianti realizzati nell'ambito della campagna di sussidi del Canton Ticino. La verifica di 5 moduli per ogni impianto e la consulenza offerta dal laboratorio hanno sicuramente avuto un effetto positivo garantendo una maggiore efficienza allo sforzo economico (1.3 milioni di franchi) dell'ente pubblico.

2.13 Conclusione

Grazie alla certificazione ISO 17025 delle misure I-V di moduli c-Si a condizioni standard, con il simulatore la centrale ha potuto svolgere una serie di test sistematici ed approfonditi (I-V @STC) permettendo di supportare i produttori di moduli e gli utilizzatori finali, garantendo la qualità dei moduli.

In breve:

- Il nuovo simulatore solare di classe A è in funzione da 3 anni.
- Le misure I-V per moduli al silicio cristallino (c-Si), secondo la norma IEC 60904-9, sono accreditate ISO 17025 dal 2001.
- La precisione e la ripetibilità delle misure è verificata periodicamente mediante misure di confronto e Round Robin test. I risultati mostrano una buona stabilità delle misure effettuate.
- Le incertezze di misura garantite del simulatore solare LEEE-TISO sono equiparabili a quelle dei principali laboratori di ricerca e servizio, e sono:

Inceteeze di misura della caratteristica I-V di moduli PV al silicio cristallino:

corrente (I): $\pm 1.4\%$
tensione (V): $\pm 1.0\%$
potenza (Pmax): $\pm 2.0\%$

- Durante il periodo 2000-2003 sono state effettuate 560 misure per terzi, di cui 377 nell'ultimo anno.
- Ogni anno si effettuano con il simulatore solare del LEEE-TISO circa 2000 flash, tra misure per la ricerca interna, misure per terzi e misure di calibrazione e confronto.

Nel prossimo progetto si vuole, oltre a mantenere l'accreditamento ISO 17025 per le misure I-V a STC dei moduli c-Si, ampliare l'offerta con:

- La messa a punto e la convalida (tramite confronti con il JRC di Ispra) di una misura certificata (ISO 17025) della caratteristica I-V in funzione della temperatura T per moduli c-Si (a irraggiamento di riferimento).
- La messa a punto e la convalida di una misura della caratteristica I-V in funzione dell'irraggiamento G per moduli c-Si.

Inoltre si vuole convalidare le misure I-V con il simulatore solare a flash di moduli thin-film (a-Si, CIGS e CdTe), con analisi approfondite effettuate outdoor.

3 MISURE A CORTO TERMINE OUTDOOR

3.1 Abstract (in English)

The I-V characteristic of a PV module is influenced by the positioning of the module, the module configuration it self and the on-site present climatic conditions.

For a fast I-V measurement a solar simulator is available in the LEEE-TISO laboratories (see previous chapter). However it is a standard characterisation method, the measurement with a solar simulator is limited to few real operating conditions. Moreover the to 2ms limited flash duration of the pulsed solar simulator does not permit to measure all types of photovoltaic modules.

To allow a fast measurement under real environmental conditions a new outdoor I-V characterisation system with a sun-tracker has been developed. For this scope an existing roof had to be finished and made accessible and safe enough for all persons working with the new equipment.

The outdoor measurements on the sun-tracker can be executed with two different I-V tracers and alternatively with a maximum power tracking system, similar to the one used on our test stand for the determination of the power matrix of a module (see chapter 4.9).

3.2 Introduzione

La caratteristica corrente-tensione dei moduli PV è influenzata dai parametri climatici, dalla posizione e dalla sua configurazione meccanica. Per effettuare una misura rapida è necessario disporre di un simulatore solare come descritto nel capitolo precedente. Tuttavia la misura con un simulatore solare, sebbene sia di riferimento per la caratterizzazione di un modulo, è limitata a pochi punti di lavoro. La misura con simulatore solare a flash ha una durata di 2ms, e non permette la misura di tutti i tipi di moduli solari fotovoltaici. Per una misura rapida in condizioni ambientali reali si è quindi resa necessaria la realizzazione di un sistema per la misura della caratteristica corrente-tensione outdoor e di un sistema di posizionamento automatico dei moduli alla normale dell'irraggiamento solare (Inseguitore Solare o “Sun Tracker”).

A tal fine è stato rifatto un tetto predisponendolo per il camminamento, con una scala di accesso e con le necessarie protezioni per le persone.

Le misure possono venir effettuate con due diversi sistemi di acquisizione della caratteristica I-V. È stato inoltre predisposto un sistema per il mantenimento del modulo a MPP, simile a quello utilizzato negli stand per la misura a medio termine, per la determinazione della matrice di potenza (vedi capitolo 4.9).

3.3 Struttura e inseguitore del sole

La costruzione del sistema di posizionamento ha comportato il rifacimento del tetto situato sopra il locale che ospita l'acquisizione dati. Oltre alla scala di accesso, si è proceduto alla costruzione del parapetto di protezione e allo spostamento della stazione di misura dei parametri meteorologici (Figura 10).



Figura 10: Tetto predisposto per il sistema di posizionamento automatico dei moduli PV alla normale dell'irraggiamento solare (Sun Tracker).

Il sistema di posizionamento dei moduli alla normale dell'irraggiamento solare Solar Tracker AZ360 EGIS è composto da due motori indipendenti e permette un posizionamento su un'estensione dell'azimut completa (0-360°), ed una elevazione fino a 68° (EL). Esso può essere azionato in 4 modi diversi: manualmente, in modo automatico, con comandi via software oppure con comandi analogici.

Dati principali:

Range azimut (AZ):	360°
Range elevazione (EL):	68°
Risoluzione interna AZ:	0.0100°/impulso
Risoluzione interna EL:	0.0025°/impulso
Risoluzione tracking a vuoto:	0.2°
Risoluzione tracking sotto carico:	0.3°
Carico massimo non bilanciato:	50kg
Carico massimo bilanciato:	90kg
Superficie massima dei moduli:	6 m ²
Velocità massima del vento, in funzione:	62 km/h
Velocità massima del vento, in attesa:	150 km/h
Range di temperatura di funzionamento:	da -20° a +65°



Figura 11: Sistema di posizionamento EGIS AZ360.

Il funzionamento standard è quello automatico, dove il sistema, considerata la posizione (latitudine e longitudine) e l'ora locale, determina la posizione del sole. Una procedura di collimazione permette di orientare il sistema ad un punto di riferimento.

È possibile controllare, via software, la posizione dei moduli PV per ottenere degli angoli di incidenza (AoI) determinati.

3.4 Sistemi di misura della caratteristica I-V (outdoor)

Al LEEE-TISO sono disponibili due sistemi di misura della caratteristica I-V in condizioni ambientali reali. Un sistema fisso (IVAQ), collegato direttamente ai moduli posti sul sun tracker, ed un sistema mobile per moduli ed impianti PV completi (PVCT).

3.4.1 I-V Tracer – PVCT

Nel corso del 2000 è stato acquistato un sistema per il rilevamento della caratteristica corrente–tensione **portatile** - I-V tracer - denominato PVCT (Photo Voltaic Curve Tracer) della ditta Solar Systeme Schutt GmbH (D) (ora h.a.l.m. elektronik GmbH). Esso permettere di effettuare misure sul campo (outdoor) sia di moduli, sia di sistemi PV. Il sistema è stato sviluppato dalla ditta Solar Systeme Schutt GmbH (D) in collaborazione con il JRC di Ispra.

Il sistema è composto da un box comprendente tre cassette: il carico elettronico o capacitivo, il sistema di misura dei parametri meteorologici e l'alimentazione con le batterie.



Figura 12: I-V tracer PVCT con Handheld PC.

L'apparecchio dispone di due tipi di carico:

- **Carico elettronico (electronic load):** basato, come per il sistema LEEE-TISO, sulla variazione della resistenza R_{DS} (Drain-Source) di un MOSFET di potenza. Il carico elettronico è idoneo per la misura di un modulo PV.
- **Carico capacitivo (capacitive load):** basato sulla carica di un condensatore. Il carico capacitivo è utilizzato nella misura di un campo completo di moduli PV, dove le potenze sono superiori.

Range di misura:

Electronic load: 100V / 20A

Capacitive load: 1000V / 25A

Il range di tensione può essere modificato (hardware) mediante la sostituzione dei partitori di tensione. Il range di corrente può essere suddiviso per 4 via software.

Per i due tipi di carico, è necessario preventivamente effettuare alcune misure di verifica del tempo di scansione della caratteristica I-V e quindi del tempo di acquisizione. Infatti esso dipende dai parametri dell'impianto o dei moduli PV e dall'irraggiamento incidente G_i , ed è quindi variabile nel tempo.

Il tempo approssimativo di carica del condensatore può essere determinato dalla seguente formula:

$$t = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} * C * \frac{1}{FF}$$

Dove chiaramente I_{sc} , la corrente di corto circuito [A], è dipendente da G_i .

V_{oc} è la tensione a vuoto [V].

FF è il fattore di riempimento (Fill Factor) [-]

C è la capacità del condensatore [F].

t è il tempo di carica [s].

Per determinare il tempo di acquisizione, in pratica però, si realizza una serie di misure per determinare il tempo minimo per ottenere una caratteristica corrente-tensione completa.

Mediante il sistema PVCT sarebbe possibile selezionare il tempo di acquisizione da 3ms a 1000ms. In pratica t varia da ca. 10ms a 100ms. Per ogni curva I-V si hanno 256 valori istantanei di corrente e tensione.

La temperatura è misurata mediante un sensore RTD al platino PT100 a tre fili.

L'irraggiamento può essere misurato contemporaneamente mediante un piranometro CM11 e mediante una cella di riferimento ESTIsensor. I valori di calibrazione dei due sensori vengono definiti su un file di setup.

Tuttavia le misure di irraggiamento con il sensore ESTIsensor si sono rivelate non affidabili, e attualmente il sistema è utilizzato unicamente con il piranometro CM11.

Precisioni di misura:

Tensione (a 25°C): $\pm 0.5\%$ full scale

Corrente (a 25°C): $\pm 0.5\%$ full scale

Irraggiamento (a 25°C): $\pm 0.5\%$ full scale

Il programma di acquisizione, è scritto in NSBASIC. Invece di un laptop, il sistema necessita di un HPC (Handheld PC). Handheld PC è un PC con sistema operativo Window CE.

Il programma di acquisizione dati è stato modificato dal LEEE-TISO per permettere una migliore calibrazione del sistema. In particolare è ora possibile modificare via software i fattori di conversione del piranometro, e non più solo in modo hardware.

3.4.2 I-V Tracer – IVAQ

Il sistema, sviluppato negli anni scorsi al LEEE-TISO (IVAQ: I-V AcQquisition), è stato momentaneamente disattivato e modificato per effettuare delle misure di verifica.

Per far ciò è stata acquistata una nuova carta di acquisizione dati PCI-MIO-16E-4 (National Instruments) al posto della carta PCMCIA DAQCard 1200.

I dati tecnici della carta di acquisizione dati PCI-MIO-16E-4 sono elencati qui di seguito:

Analog Input:

16 single-ended, 8 differential channels, 12-bit resolution,
250 kS/s multichannel scan rate, 500 kS/s single-channel sampling rate,
Channel-independent gains and ranges.

Analog Output: 2 channels, 12-bit resolution;

Digital I/O: 8 TTL lines, Counter/Timers, 2 up/down, 24-bit resolution, 20 MHz maximum source frequency.

Triggering: analog and digital; 10 programmable function inputs.

3.4.3 Box trasportabile per misure dedicate con moduli a MPPT

Il pronostico della resa energetica, descritto nel capitolo 4.9, necessita della determinazione della matrice di potenza $P_m=f(T, G)$. Gli stand della misura a medio termine permettono la determinazione della matrice completa, e con un sufficiente numero di punti. Il tempo di acquisizione è però di 15 mesi. Per ottenere una matrice delle performance di un modulo in tempi brevi è stato predisposto un sistema per il mantenimento del modulo a MPP, simile a quello utilizzato negli stand per la misura a medio termine.

Esso permette la determinazione di aree limitate della matrice di potenza dipendenti dalle condizioni climatiche istantanee. È inoltre possibile, variando l'angolo di incidenza del modulo alla normale del sole, determinare altre aree circoscritte alle condizioni climatiche.

L'armadio (box) trasportabile contiene un MPPT con un contatore di energia, le alimentazioni e il sistema di acquisizione dati.



Figura 13: Box con MPPT e alimentazioni

3.5 Conclusione

Al LEEE-TISO è stato predisposto, su un tetto della scuola, un sistema di posizionamento alla normale dell'irraggiamento diretto solare (Sun Tracker).

La misura a breve termine della caratteristica I-V di moduli è possibile mediante due sistemi versatili per la misura delle caratteristiche corrente tensione. Il primo sistema è particolarmente adatto alla misura di sistemi completi o di moduli singoli su un campo PV, il secondo sistema è invece fisso e si presta per misure di singoli moduli sul Sun Tracker. Esso servirà in particolare alle misure della caratteristica di moduli non adatti per la misura con il simulatore solare (CIGS, a-Si e CdTe).

Il sistema di posizionamento e di misura non è ancora utilizzato sistematicamente. Esso necessita ancora di cambiamenti, in particolare per quanto riguarda la rapidità della scansione della caratteristica I-V, il posizionamento automatico e l'acquisizione sistematica delle curve I-V.

Durante la prossima fase del progetto, per ogni tipo di modulo PV, saranno acquistati 3 pezzi. Due saranno installati sul sistema di misura a medio termine in condizioni ambientali reali e a MPPT (vedi prossimo capitolo), mentre il terzo modulo sarà utilizzato per una verifica delle caratteristiche I-V, degli effetti capacitivi, dei coefficienti di temperatura, del comportamento in temperatura (NOCT e $NOCT_{@MPPT}$) e della matrice di potenza e di tensione in funzione della temperatura e dell'irraggiamento $P(T, G_i)$.

4 MISURE A MEDIO TERMINE OUTDOOR

4.1 Abstract (in English)

The aims of the medium-term measurements under real operating conditions (outdoor) were:

- To verify the electrical parameters of the modules, as declared by the manufacturers
- To quantify the initial degradation of the modules currently on the market.
- To verify the electrical stability of the modules under examination.
- To verify/study the behaviour of the modules under real conditions (PR, Gdiff, ..)
- To quantify and compare energy production of the technologies being tested
- To determine and verify simple methods for predicting energy yield

Modifications in the test procedures and power measurements:

The inspection procedures for PV modules have been modified in order to take into account the observations obtained during testing:

- 1) The silicon c-Si modules undergo a degradation of ca. -2% during the first hours of exposure to light => 20kWh/m² of light soaking. After 3 months average degradation is -2.7%.
- 2) The thin film modules stabilize after at least 3 months of exposure to light => The length of the test is now 3+12 = 15 months.
- 3) The modules being tested are measured at STC every 3 months in the new ISO17025 accredited LEEE-TISO solar simulator.
- 4) Module operation (I_m , V_m , T_{bom}) and climatic parameters are measured at 1 minute intervals using the new data acquisition system.
- 5) Degradation essentially occurs in I_{sc} . After 3 months of exposure no further degradation is observed and power is stable.

Module Guarantees:

During the last few years, manufacturers have modified the limits and references of the power guarantees.

- Nearly all the manufacturers have introduced production tolerance. Some manufacturers refer to P_{min} for long term guarantees, thus making comparison between modules difficult.
- For a more reliable estimate of energy yield it would be better to use declared minimum power values (P_{min}) rather than nominal power (P_n)

Comparison of energy yields:

- The differences in the **annual** production of modules are big if they refer to nominal power P_n ('commercial' difference), because real power does not correspond to nominal power
- For c-Si modules the spread can reach 16%.
- The differences in **annual** production are more limited if they refer to **real measured power and already stabilised P15** ('technological difference').
- For c-Si modules the spread can be up to 7%.
- The manufacturer who declares nominal power which corresponds to real stabilised power, is rewarded with a higher energy yield (referring to nominal power).

Behaviour in real operating conditions:

Instant and monthly production is more differentiated and the differences more marked during periods of low insolation. However, during this period of low insolation annual production is limited and in grid-connected systems this data is not significant. The data can be interesting when modules are used only during certain periods of the year as in the case of stand-alone systems.

Matrix method for predicting energy yield:

- A method for calculating energy yield called the matrix method has been developed with good results regarding accuracy.
- The matrix method can be used with an electronic spreadsheet (like Excel).
- In order to develop the method, measurements from the test stand were used enabling us to validate the method through the monitored annual energy production of the single modules
- A measurement period of just a few weeks can be sufficient for a complete characterisation of a c-Si Module
- Medium-term measurements (15 months or 27 months) are indispensable for monitoring the behaviour of new technologies in direct comparison with traditional crystalline silicon and for intensifying the study of those technologies for which predictions of behaviour are not yet as precise as those for crystalline silicon.

4.2 Introduzione

La potenza nominale alle condizioni standard (STC) dei moduli fotovoltaici descrive solo uno dei possibili punti di funzionamento. Non dà però nessuna informazione a riguardo della resa energetica né del comportamento in condizioni climatiche reali del modulo PV.

Gli installatori e i progettisti necessitano di informazioni più dettagliate. Alcune delle domande più ricorrenti sono:

1. I dati elettrici forniti dai fabbricanti sono affidabili?
2. I moduli PV degradano nel tempo? Se sì, in che misura?
3. C'è una differenza di produzione (Wh/Wp) tra moduli PV diversi?

Per poter rispondere a queste domande il LEEE-TISO ha realizzato nei precedenti anni una centrale di collaudo per moduli PV per effettuare test sistematici in condizioni ambientali reali, dei principali moduli attualmente sul mercato,

Gli scopi delle misure a medio termine outdoor per il periodo 2000-2003, erano:

- Continuare la verifica dei parametri elettrici dei moduli, dichiarati dai fabbricanti.
- Quantificare il degrado iniziale dei moduli presenti sul mercato.
- Verificare la stabilità elettrica dei moduli in esame.
- Studiare il comportamento dei moduli a condizioni ambientali reali (PR, Gdiff, ...)
- Quantificare e confrontare la produzione di energia delle tecnologie collaudate.
- Determinare e verificare metodi semplificati di pronostico della resa energetica.

Il progetto prevede il collaudo in condizioni ambientali reali dei moduli fotovoltaici scelti tra quelli maggiormente presenti sul mercato svizzero. Ogni ciclo di test sono scelti ed acquistati anonimamente fino ad un massimo di 18 tipi di moduli fotovoltaici (2 moduli per tipo).

La procedura di collaudo messa in atto a partire dal 1993, è stata modificata nel 2000 introducendo una misura della caratteristica corrente-tensione a STC ogni 3 mesi invece dei 6 mesi precedenti. Ciò è stato reso possibile dall'acquisto e dall'accreditamento ISO17025 di un simulatore solare di classe A (vedi capitolo 2).

Il degrado iniziale dei moduli c-Si, verificato negli anni precedenti, avviene nelle prime ore di esposizione dei moduli alla luce. Un periodo di light soaking iniziale è stato conseguentemente introdotto nella procedura di collaudo. I moduli sono esposti orizzontalmente a circuito aperto (Voc) per una esposizione iniziale di $H_i \geq 20 \text{ kWh/m}^2$. In seguito i moduli sono rimisurati a STC ed installati sugli stand a MPP (Maximum Power Point) per i primi tre mesi di esposizione.

I parametri di elettrici a MPP e meteorologici sono misurati ogni minuto. Nel 2000, con l'inizio del ciclo 7, è stato messo a punto un nuovo sistema di acquisizione dati basato su datalogger Agilent 34970A su un bus GPIB.

Le misure della potenza in condizioni standard (1000 W/m^2 ; 25°C ; AM1.5) dei moduli collaudati ha permesso di verificare le dichiarazioni dei valori nominali dei fabbricanti.

Mentre il confronto della produzione di energia dei singoli moduli ha permesso di quantificare le differenze di resa energetica nell'anno in esame e per le condizioni climatiche a sud delle alpi.

Per poter realizzare un pronostico della resa energetica in luoghi e periodi diversi al LEEE-TISO è stato sviluppato un metodo di calcolo basato su una matrice di potenza P_m (G_i , T_a) e una matrice del numero di eventi climatici N (G_i , T_a). L'obiettivo principale è di permettere ad un qualunque progettista di pronosticare facilmente, con l'aiuto di un semplice foglio di calcolo elettronico, le rese energetiche di un impianto fotovoltaico.

Cicli di collaudo effettuati durante il progetto:

Ciclo 7: marzo 2000 - giugno 2001

Ciclo 8: giugno 2001 - settembre 2002

Ciclo 9: da dicembre 2002, ciclo di test in svolgimento, il termine è previsto per aprile 2004.

Ciclo 7: 17 tipi di modulo (7 sc-Si – di cui uno di riferimento, 7 mc-Si, 2 a-Si, 1 CIS).

Ciclo 8: 11 tipi di modulo (4 sc-Si; 5 mc-Si; 1 a-Si; 1 CIS). Due tipi di moduli (ST40 – CIS; ASI16-2300 – sc-Si) sono stati rimisurati un ulteriore anno consecutivo. Uno stand (spazio per due tipi di modulo) è

stato predisposto per accogliere le tegole solari Evergreen nell’ambito di un test di controllo di surriscaldamento.

Ciclo 9: 14 tipi di modulo (7 sc-Si; 6 mc-Si; 2 a-Si). Tre tipi di moduli (WS11007 – CIS; ST40 – CIS; ASI16-2300 – sc-Si), già collaudati in precedenza, sono stati esposti per un’ulteriore anno.

4.3 Procedura di test – cicli di collaudo

La procedura di collaudo messa in atto a partire dal 1993, è stata modificata nel 2000 introducendo una misura della caratteristica corrente-tensione a STC ogni 3 mesi. Ciò è stato reso possibile dall’acquisto e dall’accreditamento ISO17025 di un simulatore solare di classe A (vedi capitolo 2) . Per un controllo sistematico, le misure iniziali e finali continueranno ad essere effettuate presso il laboratorio ESTI del JRC di Ispra con il quale il laboratorio LEEE ha una stretta collaborazione.

Le misure della caratteristica corrente-tensione a STC ogni 3 mesi creano un notevole lavoro supplementare, ma nel contempo permettono una migliore verifica del degrado iniziale e a medio termine delle performance dei moduli PV.

Il degrado iniziale dei moduli c-Si, verificato nel corso degli anni e riportato pure da altri istituti, avviene nelle prime ore di esposizione alla luce dei moduli PV (vedi capitolo 4.6.1). Un periodo di light soaking iniziale è stato conseguentemente introdotto nella procedura di collaudo. I moduli al silicio cristallino sono esposti orizzontalmente a circuito aperto (V_{oc}) per una esposizione iniziale di $H_i \geq 20 \text{ kWh/m}^2$. Ciò corrisponde a circa 4 giorni in condizioni climatiche soleggiate.

In seguito i moduli sono rimisurati a STC ed installati sugli stand a MPP (Maximum Power Point) per i primi tre mesi di esposizione. Generalmente le misure intermedie (P_3 , P_6 , ecc.) richiedono l’arresto dei test, con lo smontaggio dei moduli, per non più di 2-3 giorni.

Per i moduli al silicio amorfo (a-Si) e per gli altri thin film, la procedura richiesta è leggermente differente. Il degrado iniziale è in effetti più lento e risulta necessario un periodo di stabilizzazione supplementare di tre mesi. Per questo motivo il periodo di esposizione è stato portato da 12 a 15 mesi. A partire dal 3 mese è quindi possibile un confronto diretto della produzione dei moduli c-Si e a-Si con quest’ultimi già stabilizzati.

La tabella seguente mostra l’evoluzione della procedura di test nel corso degli anni:

Cycle	Year	N° modules	P_0 & P_{12}	+ P_6	+ P_3 , P_9 , P_{15}	+ P_a	Energy production	V_m and I_m every min
1	1993	6	✓					
2	1994	6	✓					
3	1995	6	✓				✓	
4	1996	6	✓				✓	
5	1998	2	✓	✓			✓	
6	1999	2	✓	✓			✓	
7	2000	2	✓	✓	✓		✓	✓
8	2001	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	2002	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabella 4: Evoluzione della procedura di test.

Pos.	Denominazione	Azione
1	Pn	Potenza nominale: registrazione dei parametri forniti dai fabbricanti
2	Pa	Potenza all’acquisto: potenza misurata a STC prima di ogni qualsiasi esposizione alla luce.
3		Light soaking: esposizione dei moduli al silicio cristallino per un’insolazione pari a 20kWh/m ² .
4	P0	Potenza iniziale: caratteristiche elettriche @STC
5		3 mesi di esposizione per determinare il degrado dei moduli thin film
6	P3	dopo 3 mesi: caratteristiche elettriche @STC
7		Esposizione in condizioni ambientali reali a MPP durante 1 anno.
8	P6	dopo 6 mesi: caratteristiche elettriche @STC
9	P9	dopo 9 mesi: caratteristiche elettriche @STC
10	P12	dopo 12 mesi: caratteristiche elettriche @STC
11	P15	dopo 15 mesi: test finali delle caratteristiche elettriche @STC stabilizzate.

Tabella 5: Sequenza dell procedura di collaudo a medio termine LEEE-TISO, valida a partire dal 2001 e definizioni di P_x.

I progressi più importanti nella procedura di test sono stati:

- Misura della potenza a STC dei moduli esposti ogni tre mesi, con il simulatore solare LEEE.
- Misura dell’energia prodotta.
- Registrazione dei parametri elettrici di V_m e I_m ogni minuto.
- Per permettere il collaudo di un maggior numero di moduli per ciclo sono stati acquistati solo due moduli per tipo. Prima erano 6.
- Light soaking di 20kWh/m² per i moduli c-Si, ed 3 mesi di estensione del tempo di esposizione per permettere la stabilizzazione dei moduli thin film.

4.4 Metodi di misura e sistema di acquisizione dati

I moduli sono esposti in condizioni ambientali reali e installati su una struttura aperta (open rack) inclinata a 45° e un orientamento a 7°EST. Ogni singolo modulo lavora al suo punto di massima potenza (MPP: Maximum Power Point) grazie ad una apparecchiatura elettronica sviluppata appositamente. La temperatura dei moduli è misurata mediante un sensore RTD al platino (PT100) ubicato sul retro del modulo PV in corrispondenza di una cella centrale. L'irraggiamento sul piano inclinato (G_i) è misurato con alcuni piranometri (CM11) e con celle di riferimento ubicati sugli stand di misura. Una stazione meteorologica completa i dati climatici con i valori di irraggiamento globale orizzontale (G_o), irraggiamento diffuso orizzontale (G_d), temperatura dell'aria (T_a) e velocità e direzione del vento (v, d).

Nuovo sistema di acquisizione dati

Nel corso dell'anno 2000, e in concomitanza con l'inizio del ciclo di misura no. 7, è stato messo a punto un nuovo sistema di acquisizione dati basato sui datalogger Agilent (HP). Il nuovo sistema di acquisizione dati permette l'acquisizione dei dati dei parametri elettrici a MPP (V_m e I_m) e della temperatura di ogni singolo modulo e dei parametri meteorologici. Il tempo di scansione è selezionabile liberamente ed è stato impostato a 1 minuto. Ogni datalogger permette l'acquisizione di 60 canali di misura. Il numero di datalogger è limitato unicamente dal limite di indirizzamento del bus GPIB e attualmente sono utilizzati 4 datalogger, collegati ad un PC, per un totale di 280 canali di misura.

Con lo stesso sistema sono infatti pure misurati i parametri elettrici e climatici degli impianti TISO collegati alla rete, da 10kWp c-Si, da 4kWp a-Si e da 0.5kWp a-Si triple-junction.

Il programma di gestione dei datalogger e dei dati è stato realizzato nel linguaggio di programmazione grafico LabVIEW. Esso effettua, oltre alla memorizzazione dei dati, la gestione degli errori, la verifica dei tempi di scansione delle misure, la gestione dei file di salvataggio dei dati, la sincronizzazione dei tempi di scansione e la suddivisione dei file dei dati secondo le tematiche selezionate.

Lo stesso sistema di acquisizione dati con il programma in LabVIEW è stato utilizzato e modificato per il sistema di monitoraggio di un impianto a St. Moritz (impianto da 18.6kWp con moduli CIS).

L'analisi dei dati è effettuata in un secondo tempo mediante altri programmi realizzati in LabVIEW e altri programmi di visualizzazione dati.

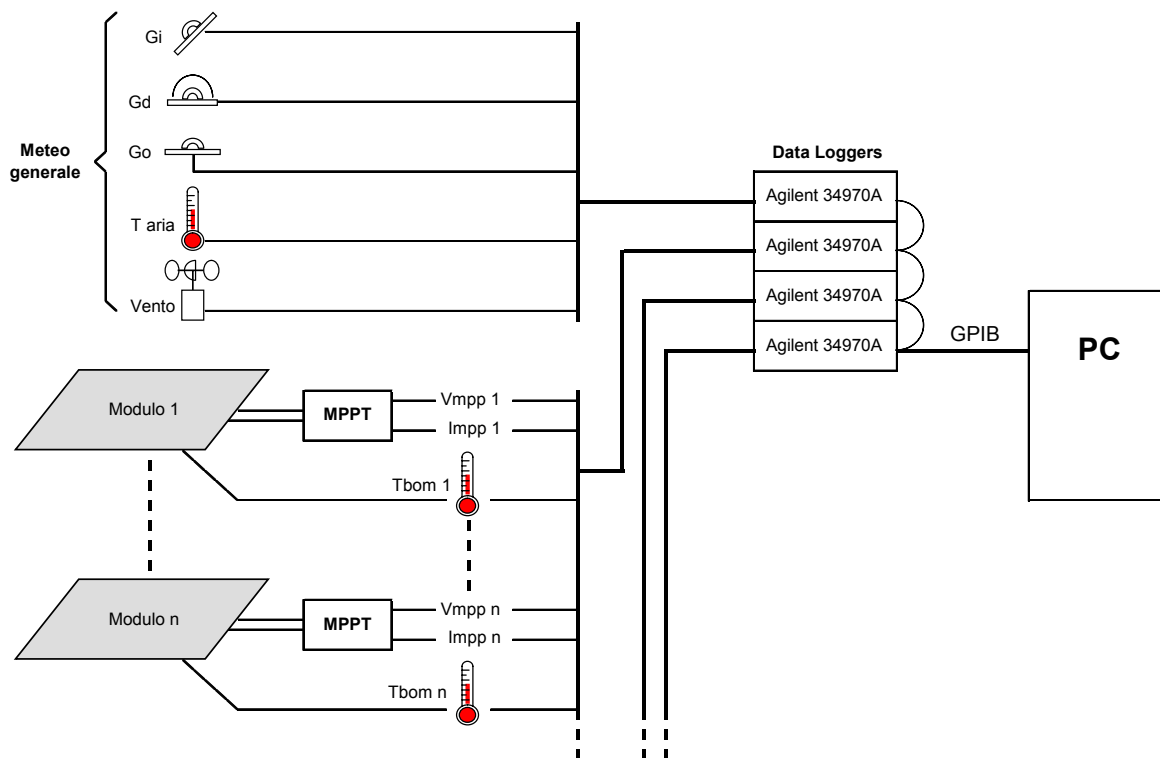


Figura 14: Schema di principio del sistema di acquisizione dati



Figura 15: Datalogger Agilent (ex HP) tipo 34970A

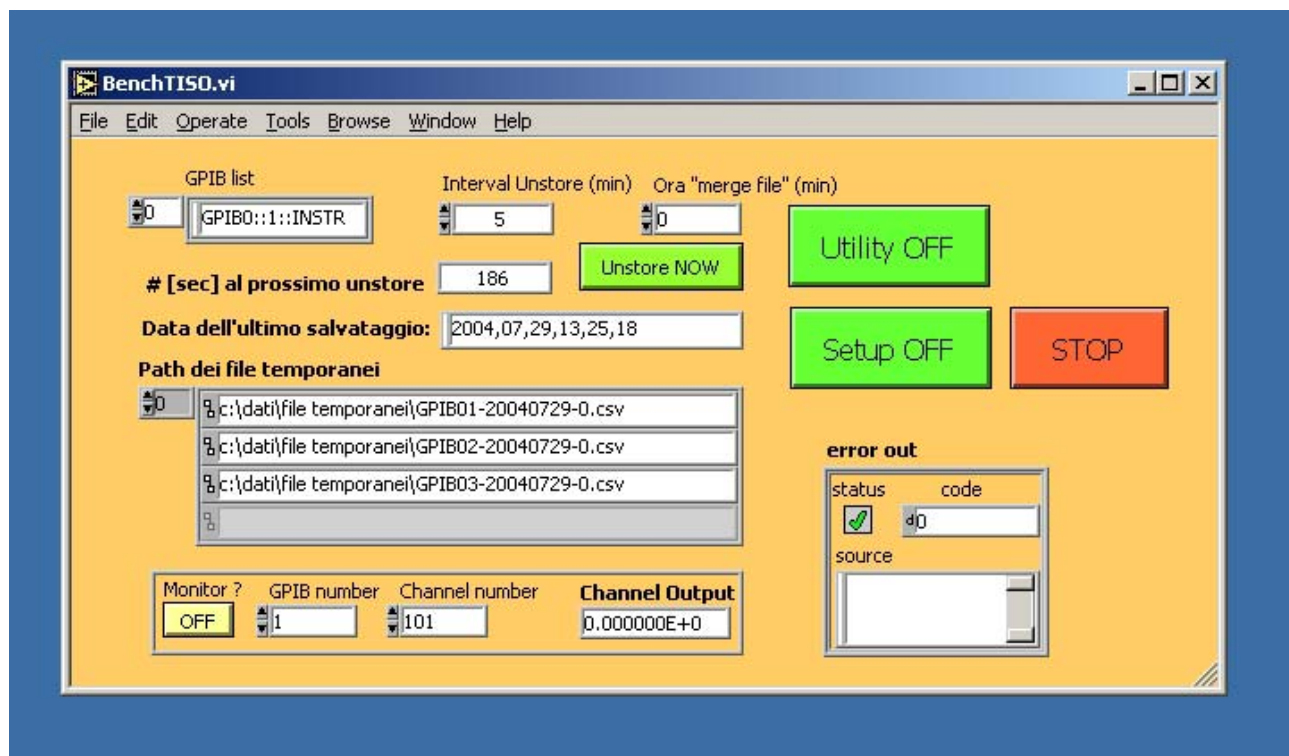


Figura 16: Programma di acquisizione dati (denominato BenchTISO) sviluppato mediante il linguaggio di programmazione grafico LabVIEW.

4.5 Scelta e acquisto dei moduli da collaudare

4.5.1 Scelta dei moduli

Per ogni ciclo di collaudo sono scelti fino a 18 tipi diversi di moduli, solitamente da fabbricanti differenti.

I moduli sono scelti principalmente tra quelli presenti sul mercato svizzero e tedesco, ma comunque su quello europeo. Altri criteri di scelta sono la diffusione nei mercati di riferimento, tecnologie interessanti per una rapida penetrazione del mercato, tecnologie nuove ma già mature (vedi CIS) oppure in fase avanzata di industrializzazione. A volte pure la facilità di reperimento e di acquisto anonimo (vedi capitolo seguente) risulta essere un aspetto non trascurabile nella scelta dei moduli.

Moduli speciali

Per contro, finora sono stati evitati quei moduli ancora in fase di produzione pilota o di ricerca. Essi non garantiscono una stabilità nella produzione sufficiente per un confronto di riferimento con altri tipi di moduli, e non possono essere considerati alla stregua di moduli tecnologicamente ed industrialmente maturi. Per questi moduli, se richiesto dal fabbricante, sono state effettuate misure speciali.

Fino ad ora sono stati evitati i moduli specialmente concepiti per l'integrazione nella costruzione ("tegole solari", facciate, ecc.), a parte per alcuni moduli di produzione svizzera (per es. i moduli Sunslates in ciclo 7).

Richieste da parte dei fabbricanti

Le richieste da parte dei fabbricanti per includere i loro moduli nei cicli di misura possono essere accolte solo in parte ma devono in ogni caso sottostare ai criteri descritti sopra. Attualmente non si ha ancora un servizio dedicato per questo tipo di richieste, a causa della mancanza di spazio sugli stand. Lo sviluppo futuro della nuova serie di MPPT permetterà di soddisfare, in parte, anche questo tipo di richieste. I moduli richiesti dai fabbricanti per un ciclo di test, sono acquistati secondo le regole dell'anonimato descritte nel capitolo seguente.

4.5.2 Acquisto

I moduli da collaudare sono acquistati anonimamente in modo da non permettere una scelta dei migliori moduli tra quelli prodotti dai fabbricanti. L'acquisto anonimo comporta un notevole dispendio di tempo ed energia. Tuttavia esso garantisce l'imparzialità del confronto tra i moduli. I risultati esposti nei capitoli seguenti, se confrontati con i dati relativi alle misure effettuate durante i primi cicli di collaudo (dal 1993) permettono di apprezzare i miglioramenti ottenuti.

I moduli sono acquistati da terze persone non collegate direttamente con il laboratorio, oppure acquistati direttamente in negozi generalmente in Svizzera, in Germania o in Italia.

Con questo prelevamento sul mercato di due esemplari per ogni tipo di modulo non si intende certamente effettuare una valutazione statistica, ma semplicemente è un piccolo campione che la ditta in questione ha immesso sul mercato.

4.5.3 Conclusione

La forte espansione del mercato tedesco e di quello giapponese, hanno portato ad una rapida evoluzione dei produttori. A livello Europeo, negli ultimi anni sono nate varie nuove aziende di produzione di celle, senza contare gli assemblatori di moduli, cioè quei fabbricanti che acquistano celle da terzi ed effettuano unicamente la laminazione. Negli ultimi anni pure i fabbricanti giapponesi sono rientrati sul mercato europeo, o meglio essenzialmente sul mercato tedesco.

L'evoluzione del mercato mondiale ha registrato, nel periodo 2000-2003 un incremento annuo del 39.4%, portando la produzione da 288MWp a 762MWp.

Le scelte operate durante questi ultimi tre anni sono state di conseguenza il riflesso di questa rapida crescita, mentre purtroppo il numero di tipi di moduli collaudati annualmente non ha potuto essere incrementato.

Le scelte nei prossimi cicli di collaudo continueranno ad essere effettuate in funzione dell'evoluzione del mercato e dei moduli disponibili per i progettisti a livello Svizzero.

Nella attuale procedura di collaudo:

- I moduli sono acquistati anonimamente.
- Per ogni ciclo si possono avere fino a 18 tipi diversi di modulo.
- Per ogni tipo di modulo sono acquistati due esemplari.

4.6 Misure di Potenza

Le misure della caratteristica corrente-tensione a STC dei moduli dei cicli di collaudo 7, 8 e 9 sono state eseguite con il nuovo (2000) simulatore solare di Classe A del LEEE-TISO, accreditato ISO17025 per le misure di moduli c-Si (vedi capitolo 2: Misure Indoor). Le misure di moduli non al silicio cristallino (a-Si, CIS, ecc.) non sono accreditate.

Nella Tabella 6 della pagina seguente sono riportati i valori nominali di potenza e i risultati delle misure a STC effettuate nel corso dei cicli 7, 8 e 9 (i valori si riferiscono alla media delle potenze di ogni coppia di moduli). Le colonne successive illustrano il degrado intervenuto nel corso del tempo e dipendente dalla tecnologia. Le ultime colonne mostrano le differenze tra i valori misurati e quelli dichiarati dai fabbricanti.

Dai dati riportati nella Tabella 6 si possono sintetizzare due prime importanti informazioni:

- Il **degrado iniziale** dei moduli esaminati tramite l'analisi dei dati **misurati**.
- Il **rispetto delle garanzie** tramite il confronto dei valori **misurati finali** (stabilizzati) con quelli garantiti dai fabbricanti (P_n).

➤ I due aspetti non devono essere confusi, in quanto il primo (degrado iniziale) è di natura tecnologica (**diminuzione relativa** delle performance del modulo), mentre il secondo (confronto con i valori dichiarati dall'ufficio vendita del fabbricante) ha piuttosto a che fare con "strategie" di mercato dei fabbricanti che dichiarano valori non reali. Al LEEE-TISO sono analizzati e presentati entrambi gli aspetti, perché si vuole fornire informazioni sia ai progettisti sia agli utilizzatori finali. I miglioramenti nelle dichiarazioni dei fabbricanti sono evidenti e mostrano l'importanza di questo tipo di attività (si veda capitolo 4.7 Garanzie dei fabbricanti)

Il numero e i tipi di moduli collaudati per ogni ciclo sono così riassunti:

Ciclo 7: 17 tipi di modulo (7 sc-Si – di cui uno di riferimento, 7 mc-Si, 2 a-Si, 1 CIS).

Ciclo 8: 11 tipi di modulo (4 sc-Si; 5 mc-Si; 1 a-Si; 1 CIS).

Uno stand (spazio per due tipi di modulo) è stato predisposto per accogliere le tegole solari Evergreen nell'ambito di un test di controllo di surriscaldamento. Due tipi di moduli (ST40 – CIS; ASI16-2300 – sc-Si) sono stati rimisurati un ulteriore anno consecutivo.

Ciclo 9: 14 tipi di modulo (7 sc-Si; 6 mc-Si; 2 a-Si). Tre tipi di moduli (WS11007 – CIS; ST40 – CIS; ASI16-2300 – sc-Si) sono stati rimisurati un ulteriore anno consecutivo.

Definizioni:

P_n : Potenza **dichiarata** dal fabbricante

P_a : Potenza misurata a STC immediatamente dopo l'acquisto;

P_0 : Potenza misurata a STC dopo 20kWh/m² di insolazione (solo per moduli c-Si);

P_3 : Potenza misurata a STC dopo 3 mesi di esposizione;

P_6 : Potenza misurata a STC dopo 6 mesi di esposizione

P_9 : Potenza misurata a STC dopo 9 mesi di esposizione

P_{12} : Potenza misurata a STC dopo 12 mesi di esposizione

P_{15} : Potenza misurata **alla fine dei tests**; potenza misurata a STC dopo 15 mesi di esposizione

$(P_0 - P_a)/P_a$: **degrado** durante il periodo di esposizione a 20kWh/m² di insolazione (solo per moduli c-Si);

$(P_3 - P_a)/P_a$: **degrado** durante il periodo intercorso tra il momento dell'acquisto e dopo 3 mesi di esposizione.

$(P_{15} - P_a)/P_a$: **degrado** durante il periodo intercorso tra il momento dell'acquisto e dopo 15 mesi di esposizione.

$(P_{15} - P_3)/P_3$: **degrado** durante l'anno di conteggio della resa energetica.

$(P_a - P_n)/P_n$: **differenza** tra la potenza **dichiarata** dal fabbricante e la potenza reale **all'acquisto**.

$(P_3 - P_n)/P_n$: **differenza** tra la potenza **dichiarata** dal fabbricante e la potenza reale dopo 3 mesi.

$(P_{15} - P_n)/P_n$: **differenza** tra la potenza **dichiarata** dal fabbricante e la potenza reale **stabilizzata**.

Nota: un modulo SW50T si è rotto durante i test; i dati riportati riguardano unicamente un solo modulo.

Dati fabbricante			Dati misurati al LEE-TISO							Degrado, dipendente dalla tecnologia				Differenza (vs. Pn) di marketing		
Tipo	Ciclo	Pn	Pa	P0	P3	P6	P9	P12	P15	(P0-Pa)/Pa	(P3-Pa)/Pa	(P15-Pa)/Pa	(P15-P3)/P3	(Pa-Pn)/Pn	(P3-Pn)/Pn	(P15-Pn)/Pn
ASE-100-GT-FT	7	100	100.7		97.5	96.7	97.4	96.3	96.9		-3.2%	-3.8%	-0.6%	0.7%	-2.6%	-3.1%
APX90		90	69.2		68.6	67.9	67.6	67.0	66.7		-0.8%	-3.5%	-2.8%	-23.2%	-23.8%	-25.9%
Sunslates		12	10.9		10.2	10.0	10.1	10.1	10.2		-6.6%	-6.7%	-0.1%	-9.2%	-15.2%	-15.3%
BP275F		75	69.2		70.0	69.0	69.2	68.6	68.5		1.2%	-1.0%	-2.1%	-7.8%	-6.7%	-8.7%
M500A		55	49.3		48.8	49.1	48.8	47.8	48.9		-1.1%	-0.9%	0.2%	-10.4%	-11.4%	-11.2%
GPV75P		75	63.1		63.2	62.7	62.1	60.5	62.0		0.1%	-1.7%	-1.8%	-15.9%	-15.8%	-17.3%
KC60		60	55.1		53.7	54.5	54.3	54.2	54.1		-2.5%	-1.9%	0.7%	-8.2%	-10.5%	-9.9%
PW1000		91	84.5		84.4	85.0	85.1	85.1	85.2		-0.1%	0.8%	0.9%	-7.2%	-7.3%	-6.4%
RSM50		49	45.3		44.9	44.4	44.7	44.0	44.6		-0.9%	-1.5%	-0.7%	-7.7%	-8.5%	-9.1%
SM55		55	52.6		50.1	50.2	50.0	49.5	49.5		-4.8%	-5.9%	-1.2%	-4.5%	-9.0%	-10.1%
MSX83		83	78.8		75.2	75.6	75.6	75.0	75.1		-4.6%	-4.7%	-0.1%	-5.1%	-9.5%	-9.5%
SW50T		50	40.5		36.7	34.4	34.2	33.8	31.6		-9.4%	-22.0%	-13.9%	-19.0%	-26.6%	-36.8%
M-S36-53		53	48.4		48.6	48.2	48.1	47.6	47.5		0.5%	-1.9%	-2.4%	-8.8%	-8.3%	-10.5%
MEDIA c-Si											-2.5%	-4.2%	-1.8%	-9.7%	-11.9%	-13.4%
DS40		40	38.7		34.4	33.0	31.8	30.8	32.1		-11.2%	-17.1%	-6.6%	-3.2%	-14.1%	-19.8%
ST40		38	38.4		35.4	34.3	35.1	34.8	32.8		-7.7%	-14.6%	-7.5%	0.9%	-6.8%	-13.8%
US64		64	57.0		50.8	50.7	48.2	47.5	49.0		-10.9%	-14.1%	-3.6%	-10.9%	-20.6%	-23.5%
BP555	8	55	54.4	53.7	53.7	53.5	53.7	53.8	53.8		-1.2%	-1.1%	0.2%	-1.2%	-2.5%	-2.3%
KC70		70	64.8	62.9	62.6	62.1	62.3	62.1	62.5		-2.9%	-3.4%	-0.2%	-7.5%	-10.6%	-10.8%
SM50H		50	46.5	45.2	44.8	44.9	44.9	45.2	44.9		-2.8%	-3.7%	0.2%	-7.0%	-10.4%	-10.2%
A60		60	55.1	54.6	54.3	53.9	54.0	54.2	53.9		-0.8%	-2.1%	-0.7%	-8.3%	-9.5%	-10.2%
I110		110	97.0	95.4	96.0	95.6	95.0	94.9	95.2		-1.6%	-1.0%	-0.8%	-11.8%	-12.7%	-13.5%
APX90		90	77.9	76.6	76.1	76.3	75.9	75.5	75.9		-1.6%	-2.2%	-0.3%	-13.5%	-15.4%	-15.7%
PW750		75	67.3	66.7	66.6	66.1	66.0	66.3	66.2		-0.9%	-1.1%	-0.6%	-10.3%	-11.3%	-11.8%
MSX84		64	63.3	60.2	60.0	60.0	59.8	59.5	60.0		-4.9%	-5.3%	0.0%	-1.1%	-6.3%	-6.3%
RSM70		68	66.0	65.9	65.7	65.6	65.2	65.6	65.5		-0.2%	-0.5%	-0.3%	-2.9%	-3.4%	-3.7%
MEDIA c-Si											-1.2%	-2.2%	-0.3%	-7.1%	-9.1%	-9.4%
US32		32	33.4		26.1	24.3	23.5	24.2	24.5		-21.9%	-26.6%	-6.1%	4.4%	-18.4%	-23.4%
WS11007		57	50.9		55.4	55.6	55.2	53.8	53.9		8.8%	6.0%	-2.6%	-10.8%	-2.9%	-5.4%
EC-110	9	110	111.2	109.5	107.6	108.6	108.1	106.6			-1.5%			1.0%	-2.2%	
Sol140		142.2	137.6	134.1	132.2	132.8	133.5	132.0			-2.5%			-3.2%	-7.0%	
A-120 P5		120	109.4	108.3	105.8	106.3	105.7	105.2			-0.9%			-13.8%	-11.8%	
ASE-100-GT-FT		100	101.8	99.4	97.7	98.5	96.6	96.2			-2.4%			1.8%	-2.3%	
I106		106	100.4	100.1	99.0	100.8	100.4	98.8			-0.2%			-5.3%	-6.6%	
BP5170		170	170.7	167.5	166.6	167.5	167.5	165.9			-1.8%			0.4%	-2.0%	
MSX120		120	116.0	111.5	109.3	110.0	109.9	108.4			-3.9%			-3.3%	-9.0%	
KC120-2		120	112.7	109.6	107.9	110.0	108.5	107.6			-2.7%			-6.1%	-10.1%	
SB160		160	149.6	146.3	142.1	142.0	141.3	139.8			-2.2%			-6.5%	-11.2%	
MHP180		175	171.7	171.7	170.2	171.1	170.4	168.7			0.0%			-1.9%	-2.8%	
RSM105		104	103.7	102.6	102.4	102.7	102.5	102.0			-1.1%			-0.3%	-1.6%	
AC165P		165	160.4	156.5	154.8	153.2	152.1	151.8			-2.5%			-2.8%	-6.2%	
MEDIA c-Si											-1.8%			-3.3%	-6.1%	
US-116		116	113.6		94.4	93.3	92.1	88.7			-16.9%			-2.1%	-18.6%	
K58		71	65.0		47.8	49.6	47.7	44.1			-26.5%			-8.5%	-32.7%	

Tabella 6: misura potenze dei moduli testati nei cicli 7, 8 e 9 (media delle potenze dei 2 campioni), degrado nel tempo e confronto con i valori dichiarati dai fabbricanti. Le righe colorate evidenziano i moduli thin-films (per i quali non viene calcolato il degrado iniziale con light soaking a 20kWh/m²).

4.6.1 Degradamento iniziale nei moduli c-Si

Misure di prova su singoli moduli

Nei moduli al silicio cristallino avviene un degrado iniziale della potenza quando sono esposti in condizioni reali di funzionamento. Per verificare i tempi di questo fenomeno, quattro moduli (2 sc-Si e 2 mc-Si) sono stati esposti, a circuito aperto, e misurati (con simulatore LEEE-TISO), dopo diversi stadi di insolazione incidente.

I risultati ottenuti, rappresentati nella

Figura 17, hanno dimostrato che un modulo c-Si nuovo, appena viene esposto, presenta una diminuzione del valore di I_{sc} attorno al 2.5 - 3.5%; questo degrado avviene principalmente nelle prime ore d'esposizione (<2.7 kWh/m²). Le ulteriori prove (12.8 e 17.9 kWh/m²) sui moduli hanno mostrato una variazione del valore di I_{sc} nell'intervallo dell'errore di misura. Questo fenomeno è stato osservato nei cicli di collaudo precedenti, in quasi tutti i tipi di moduli c-Si.

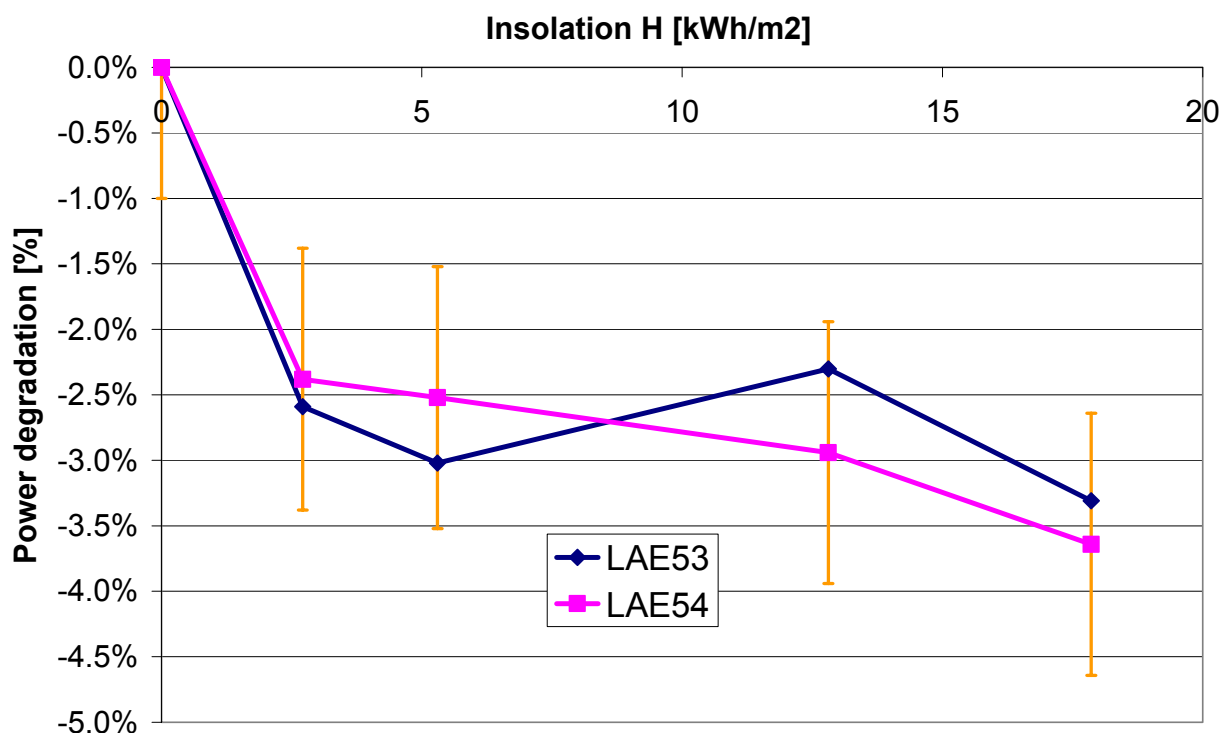


Figura 17: degrado iniziale della potenza, nelle prime ore di esposizione, nei moduli al silicio cristallino.

Per evitare che l'effetto del degrado influenzi la determinazione della resa energetica la procedura di collaudo è stata quindi modificata (nel 2001, a partire dal ciclo 8) inserendo un periodo di esposizione iniziale con un'insolazione incidente totale di almeno $H_i = 20$ kWh/m².

Su un campione di 98 moduli c-Si collaudati al LEEE-TISO nel periodo 1997-2003, la diminuzione di P è stata del -3.0%. Il degrado si situa normalmente tra lo -0% e il -5% rispetto alla potenza iniziale P_a .

La Figura 18 mostra il degrado di I_{sc} in funzione del degrado di P_m . Per la maggioranza dei moduli il degrado avviene in I_{sc} , mentre i valori di V_{oc} e FF risultano essere nei limiti di precisione della strumentazione di misura (vedi Figura 19 e Figura 20).

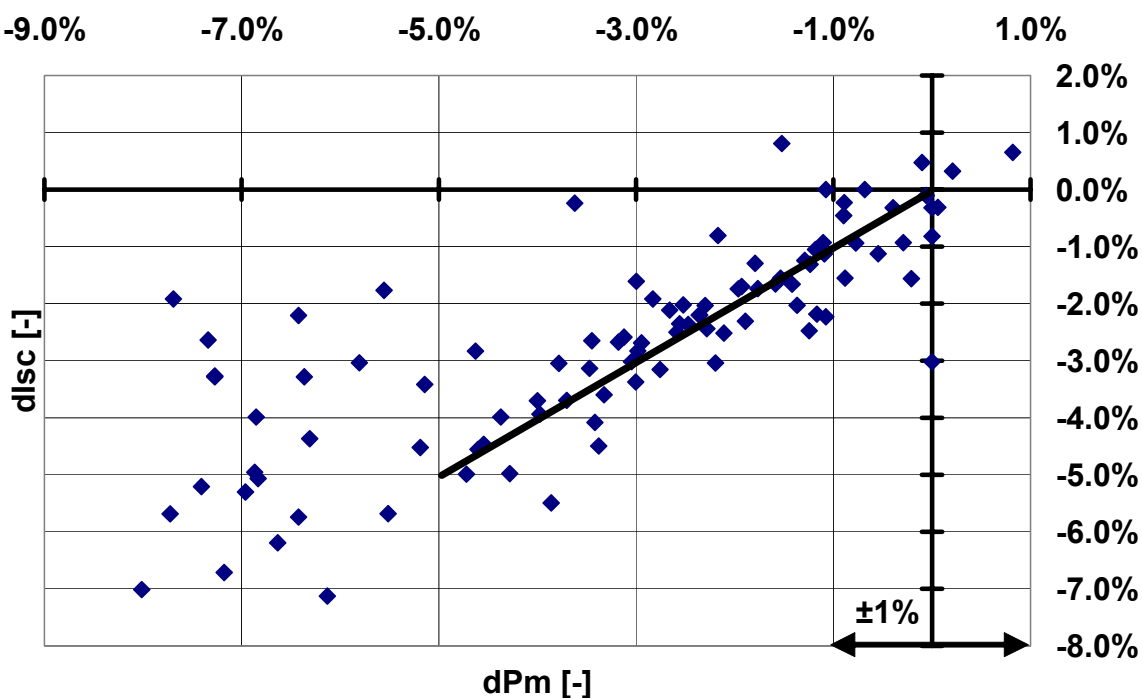


Figura 18: degrado di I_{sc} vs. degrado di P_m dopo 3 mesi di esposizione, per 98 moduli c-Si (1997-2003).

Considerando pure la precisione di misura relativa ($\pm 1\%$), per diminuzioni fino al -5% si osserva una relazione lineare tra diminuzione di potenza e diminuzione di corrente di corto-circuito.

Moduli con diminuzioni superiori (>5%) non hanno una diretta correlazione con I_{sc} , ma mostrano un'influenza superiore dei parametri di tensione a vuoto e del Fill Factor FF (vedi Figura 19 e Figura 20).

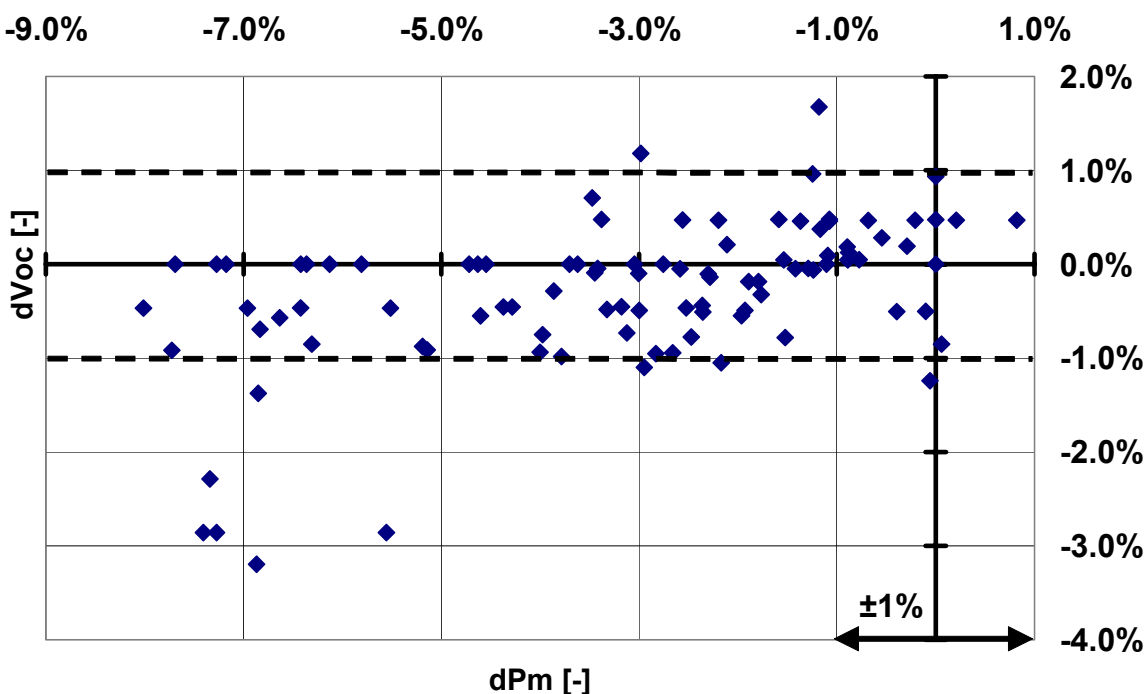


Figura 19: degrado di V_{oc} vs. degrado di P_m dopo 3 mesi di esposizione, per 98 moduli c-Si (1997-2003).

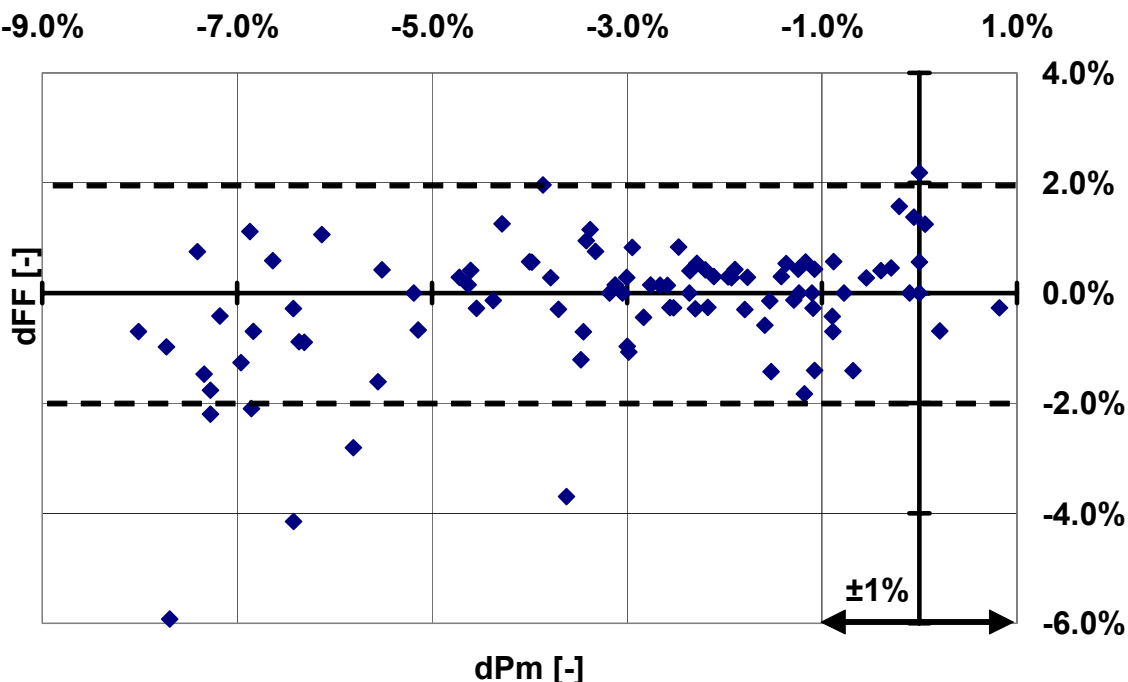


Figura 20: degrado di FF vs. degrado di Pm dopo 3 mesi di esposizione, per 98 moduli c-Si (1997-2003).

Degrado iniziale dei moduli a-Si negli ultimi tre cicli di test (cicli 7,8 e 9)

Nel ciclo no. 7 il degrado iniziale può essere valutato unicamente dopo 3 mesi di esposizione a partire dai moduli appena acquistati e non ancora esposti. La diminuzione media, $(P3-Pa)/Pa$ di Tabella 6 dei moduli del 7° ciclo, è stata del **-2.5%**, con variazioni tra i moduli **da -9.4% a +1.2%**.

Nei due ultimi cicli di test (8 e 9 i.e. 2001-2003) la stessa diminuzione media, $(P3-Pa)/Pa$ di Tabella 6, è stata invece del **-2.8%**, con variazioni tra i moduli **da -5.8% a +0.5%**.

Nel primo periodo di esposizione corrispondente a 20kWh/m^2 di insolazione i moduli c-Si del ciclo 8 e 9 hanno subito un degrado medio, $(P0-Pa)/Pa$ di Tabella 6, del **-1.8%**, con variazioni tra i moduli **da -4.9% a +0.0%**.

Nelle prime ore di esposizione avvengono i 2/3 del degrado iniziale, e nei tre mesi successivi il rimanente 1/3.

Sui tre cicli del progetto (ciclo 7, 8 e 9) il degrado medio nei primi tre mesi di esposizione è del **-2.7%**.

Precedenti esposizioni alla luce e tempi di immagazzinamento con conseguente degrado dei moduli acquistati non sono conosciuti, per cui la potenza iniziale P_a misurata al LEEE-TISO può corrispondere al valore di potenza dei moduli c-Si già degradati (per esempio il modulo MHHplus180 (ciclo 9) e il modulo RSM70 (ciclo 8)).

➤ La procedura di collaudo è stata modificata inserendo un periodo di esposizione iniziale con un'insolazione incidente totale di almeno **$H_i = 20 \text{ kWh/m}^2$** . (nel 2001, a partire dal ciclo 8).

➤ Il degrado medio **iniziale** nei moduli c-Si è di ca. il **-2%**.

➤ Il degrado medio nei moduli c-Si dopo i primi tre mesi di esposizione è del **-2.7%**.

4.6.2 Degradazione iniziale e a medio termine nei moduli thin film

Premessa:

Per i moduli thin film (essenzialmente del tipo a-Si e CIS), i risultati delle misure effettuate con simulatore solare ad impulso, vanno interpretati con cautela. In particolare i tempi di reazione delle celle PV potrebbero essere più lenti rispetto alla durata del flash (effetti dinamici), la cella di riferimento non ha la stessa risposta spettrale dei moduli ed, infine, grande importanza assume l'effetto memoria dei moduli stessi.

Risultati:

Per i moduli thin film sono da considerare principalmente i degrading intervenuti durante i primi tre mesi di esposizione (colonna (P3-Pa)/Pa) e il periodo seguente di un anno completo (colonna (P15-P3)/P3).

Il numero esiguo di tipi di modulo e di campioni non permette di effettuare una valutazione statistica, si può comunque notare che i moduli a-Si (DS40, US64 e US32) subiscono un forte degrado iniziale come è normale attendersi (-11.2%, -10.9% e -21.9%, per poi rallentare il degrado durante l'anno completo di esposizione. Sorprendente è il degrado dei moduli US32 che complessivamente subiscono un degrado del -26.6%, notevolmente superiore al degrado complessivo di -14.1% dei moduli US64, di medesima tecnologia (a-Si triple-junction) e costruzione (Uni-Solar).

Le variazioni di potenza dei moduli al silicio amorfo sono pure influenzate dai cicli climatici (termici e di irraggiamento) stagionali, per cui in una misura nello stesso giorno dell'anno successivo il modulo non necessariamente ha subito il medesimo ciclo climatico.

Nei moduli CIS ST40 (Siemens-Shell) si nota un degrado della misura di potenza indoor. Tuttavia esso non corrisponde ad un degrado delle performance outdoor. Questo fatto è stato pure riscontrato nell'impianto di 18.6kWp con moduli CIS a St. Moritz, dove la resa energetica è rimasta costante ed elevata, nel corso degli anni.

Nei moduli ST40 le misure effettuate con il simulatore solare ad impulso come quello del LEEE-TISO mostrano dei valori inferiori a quelli misurati outdoor o con simulatore ad irraggiamento continuo, a meno che il modulo non sia stato esposto, subito prima della misura, per un periodo esteso alla luce. Tuttavia questa differenza non è prevedibile, e di conseguenza non è possibile definire un fattore di conversione dei risultati della misura con il simulatore solare ad impulso [6, 7].

Nei moduli WS110077 (Würth) la potenza iniziale P_a risulta essere più bassa della potenza stabilizzata (da P3 a P15, vedi Tabella 6). Questo aumento di potenza iniziale è pure documentato nei risultati, non ancora pubblicati, del progetto Europeo appena concluso PYTHAGORAS (ENK5-CT-2000-00334; "Preparing the market for novel polycrystalline thin film photovoltaic generators by examination and assessment of field performance").

A partire dal terzo mese e per un intero anno di esposizione, il degrado medio annuale dei moduli thin film dei cicli di collaudo 7 e 8 è stato del **-5.3%**, con variazioni tra i 5 tipi di moduli (a-Si e CIS) **da -7.5% a -2.6%**.

Sebbene la stabilità dei moduli thin film è più critica in tutti e due le tecnologie di moduli, è da notare la superiore resa energetica a parità di potenza (vedi capitolo 4.8).

- Il periodo di instabilità dei moduli thin film è più lungo che nei moduli c-Si.
- I moduli CIS WS11007 mostrano un aumento iniziale della potenza (primi tre mesi di esposizione).
- Il degrado iniziale dei moduli US32 differisce molto dal degrado dei moduli US64 del medesimo fabbricante.
- Nei moduli CIS ST40 la misura indoor con simulatore ad impulso risulta dipendente dal periodo climatico antecedente la misura stessa.
- Nei moduli a-Si la potenza istantanea stagionale è influenzata dal periodo climatico antecedente la misura.
- Sebbene sia alcuni moduli CIS che i moduli a-Si sono influenzati nei risultati dal periodo climatico antecedente la misura, gli effetti e le cause sono differenti !

4.6.3 Degrado a medio termine nei moduli c-Si

Il degrado a medio termine è qui considerato il degrado durante un anno dopo la fase iniziale di tre mesi.

Nota: Il modulo SW50T non è qui considerato nelle valutazioni perché le performance degradavano ininterrottamente. I dati si riferiscono ad un solo modulo perché il secondo modulo non era più funzionante alla fine dei test.

Il degrado medio annuale dei moduli c-Si dei cicli di collaudo 7 e 8 è stato del **-0.6%**, con variazioni tra i moduli **da -2.8% a +0.9%**.

Nel solo ciclo 7 si sono avuti delle variazioni superiori all'errore di ripetibilità delle misure del $\pm 1\%$, mentre nel ciclo 8 il degrado medio annuale dei moduli è stato del **-0.3%**, con variazioni tra i moduli **da -0.8% a +0.2%**.

Il degrado dei moduli c-Si dopo il primo periodo di stabilizzazione si situa nei limiti di ripetibilità delle misure.

In un campione più esteso di 76 moduli al silicio cristallino collaudati durante il periodo 1997-2002 il degrado medio della potenza **durante il primo anno di esposizione** alle condizioni climatiche reali è stato del -1.2%.

Il degrado relativo medio della corrente di corto-circuito I_{sc} è stato invece del -0.6%, della tensione a vuoto V_{oc} del -0.2% e del Fill Factor FF del -0.4%. Sebbene i limiti degli errori di ripetibilità non permettono di osservare un reale degrado in I_{sc} , V_{oc} e FF, l'andamento negativo di P_m è superiore alla precisione di ripetibilità della misura a STC.

L'ulteriore degrado di P_m sembra comunque derivare dalla diminuzione di I_{sc} a STC (vedi Figura 21).

Per diversi moduli con un degrado $>2\%$ in P_m , si nota pure una diminuzione in V_{oc} e nel Fill Factor (vedi Figura 22 e Figura 23).

Una differenza tra i moduli sc-Si e mc-Si non è misurabile e non permette di distinguerli in due categorie separate.

4.6.4 Riassunto dei degradi, dipendenti dalla tecnologia

Dall'analisi dei dati (cicli 7, 8 e 9) risulta, per i moduli al silicio cristallino:

- Degrado medio iniziale, dopo 20 kWh/m² d'insolazione $\cong -1.8\%$
- Degrado medio dopo 3 mesi rispetto a P_a (cicli 7, 8 e 9) $\cong -2.7\%$
- Degrado medio dopo 15 mesi rispetto a P_a (cicli 7 e 8) $\cong -2.6\%$ *
- Degrado medio dopo 15 mesi rispetto a P_3 (cicli 7 e 8) $\cong -0.6\%$ *

* Senza i moduli SW50T

4.6.5 References

- [1] D. Chianese et al.; "Degradation of crystalline silicon modules", Simposio nazionale fotovoltaico 1999, Zürich (CH), November 1999.
- [2] S. Sterk, K.A. Münzer, S.W. Glunz, "Investigation of the Degradation of Crystalline Silicon Solar Cells", 14th EPVSEC, Barcelona (S), July 1997.
- [3] J. Schmidt, A.G. Aberle, R. Hezel, "Investigation of Carrier Lifetime Instabilities in CZ-grown Silicon", 26th IEEE PVSC, Anaheim (US), October 1997.
- [4] A. Moehlecke et al., "Stability Problems in (n)p⁺pp⁺ Silicon Solar Cells", 2nd World PVSEC, Wien, 1998.
- [5] Risultati del progetto Europeo PYTHAGORAS; ENK5-CT-2000-00334; "Preparing the market for novel polycrystalline thin film photovoltaic generators by examination and assessment of field performance". Comunicazioni private.
- [6] P. Johnson et al., "Effects of buffer layers on SSI CIGSS-absorber transient I-V and C-V behaviour", 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage Alaska, September 2000.
- [7] D. Willett and S. Kuriyagawa, "The effect of sweep rate, voltage bias and light soaking on the measurement of CIS-based solar cell characteristics", 2nd World PVSEC, Wien, 1998.

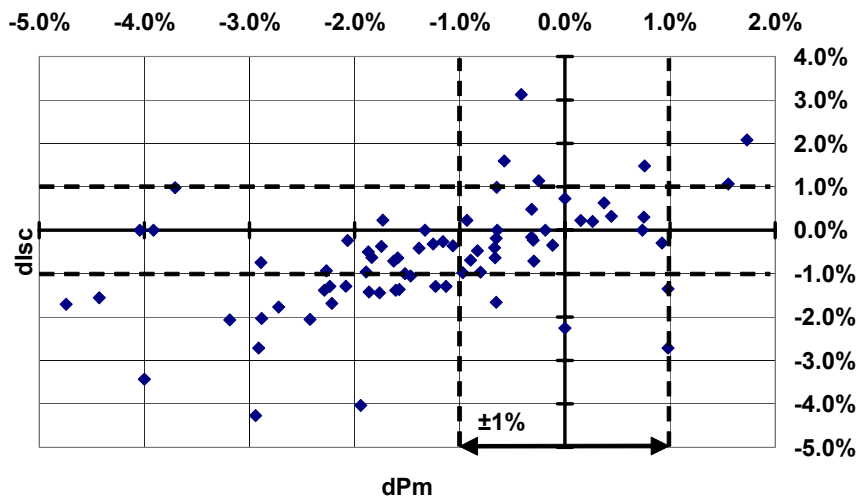


Figura 21: degrado di Isc vs. degrado di Pm dopo 1 anno di esposizione, per 76 moduli c-Si (1997-2002).

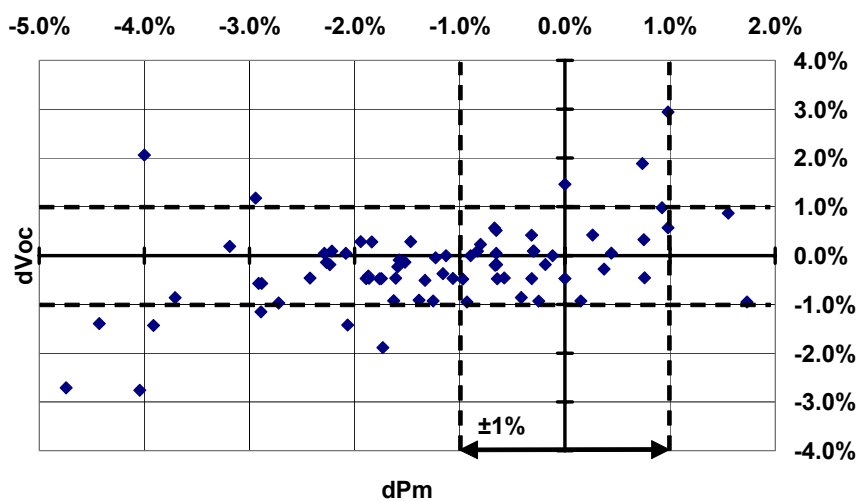


Figura 22: degrado di Voc vs. degrado di Pm dopo 1 anno di esposizione, per 76 moduli c-Si (1997-2002).

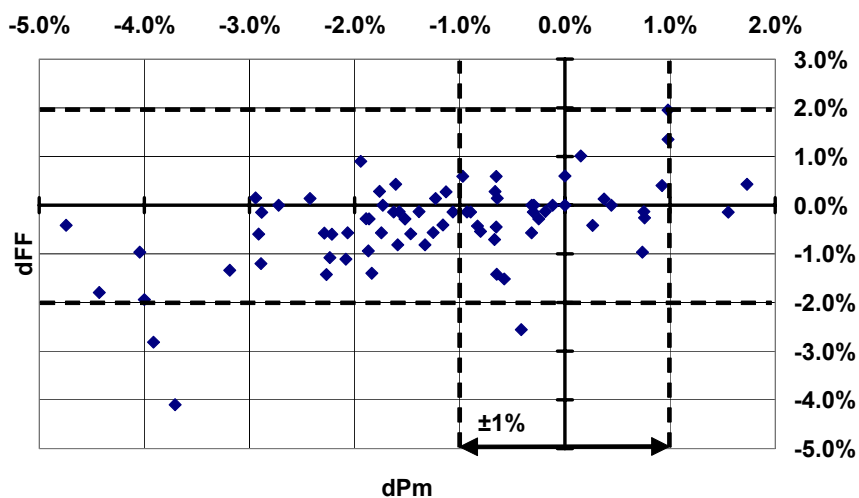


Figura 23: degrado di FF vs. degrado di Pm dopo 1 anno di esposizione, per 76 moduli c-Si (1997-2002).

4.7 Garanzie dei fabbricanti

4.7.1 Definizione delle garanzie

Nel corso degli ultimi anni, i fabbricanti hanno modificato la definizione dei limiti delle potenze e delle garanzie dei loro moduli fotovoltaici.

Normalmente il limite di garanzia sulla potenza viene espresso come percentuale della potenza nominale in anni.

$$P_w = P_n \pm w \quad (\text{dopo } X \text{ numero di anni})$$

Equazione 1: Garanzia sulla potenza nominale espressa in [%] oppure in [W] e riferita ad un determinato numero di anni.

Dove:

- P_n è la potenza nominale del modulo.
- w è la variazione massima sulla potenza nominale espressa in [%] oppure in [W].
- P_w è la potenza garantita (“warranty”).
- X è il numero di anni della garanzia.

Gli acquirenti sono ora coscienti che anche i moduli al silicio cristallino hanno un degrado iniziale (vedi capitolo 4.5) oltre alla dispersione dei valori di potenza nella produzione (distribuzione normale). I fabbricanti hanno di conseguenza introdotto una tolleranza di produzione (production tolerances) ($\pm t_p$) nella dichiarazione di potenza e di conseguenza definito una **potenza minima** all’acquisto (prima del degrado):

$$P_{\min} = P_n \pm t_p$$

Equazione 2: Potenza minima all’acquisto.

dove t_p è espresso in [%] oppure in [W].

P_{\min} è quindi la potenza **iniziale** garantita dal fabbricante all’acquirente.

Se prima la garanzia era riferita direttamente alla potenza nominale P_n , ora i fabbricanti sempre più spesso riferiscono la garanzia alla potenza minima P_{\min} .

$$P_w = (P_n - t_p) - w$$

Equazione 3: Limite di potenza garantita P_w .

La misura della potenza reale mediante un simulatore solare introduce un’incertezza dovuta alla precisione dello strumento di misura. Per cui il limite di garanzia deve tener conto della precisione dello strumento e l’Equazione 3 diventa:

$$P_{w,\min} = ((P_n - t_p) - w_{(P_{\min})}) - m_{(P_w)}$$

Equazione 4: Limite di potenza garantita P_w . Dove m = precisione di misura (per es. $\pm 3\%$).

Ciò vuol dire che, per esempio, in un modulo con $P_n = 100W$, una tolleranza di produzione $t = \pm 10W$ e una garanzia di $w = \pm 20\%$ in 20 anni rispetto a P_{\min} , il limite di potenza garantito sarà di 69.8W.

Nel confronto delle garanzie tra i diversi tipi di modulo bisogna tener conto del riferimento a cui la garanzia è applicata.

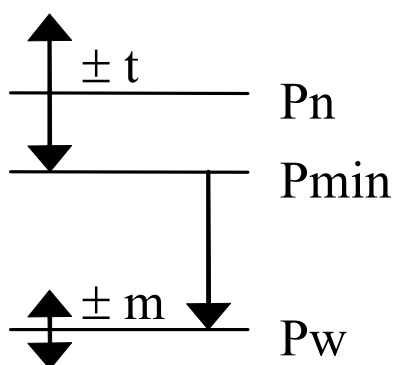


Figura 24: Relazioni tra i parametri di potenza dichiarati dal fabbricante.

L'esperienza maturata nei precedenti anni ha mostrato una alta affidabilità dei moduli PV nel tempo. La potenza iniziale, dopo il primo degrado, è mantenuta per molti anni [1]. Una misura della potenza iniziale di un campione di moduli permette di evitare una limitata produzione di energia dovuta ad una errata dichiarazione della potenza.

- Nel corso degli ultimi anni i **limiti** e i **riferimenti** della garanzia sulla potenza sono stati modificati.
- I fabbricanti hanno introdotto la tolleranza di produzione ($\pm t$ oppure P_{min}) nella dichiarazione di potenza.

4.7.2 Garanzie e valori reali a confronto

Le differenze tra i valori **dichiarati** e i valori **reali** (misurati a STC), sono relativi a decisioni di marketing dei fabbricanti. Dichiarando una potenza superiore a quella reale e vendendo i moduli in funzione della potenza [Wp] dichiarata, aumenta proporzionalmente il guadagno dei fabbricanti. Tuttavia una dichiarazione “gonfiata” risulta controproducente in termini di **resa energetica apparente**. Il “final yield” (Y_f) [kWh/kWp] risulterà infatti inferiore. La resa energetica percepita dal committente (resa energetica apparente) è praticamente sempre relativa alla potenza nominale e mai alla potenza reale.

Anche le analisi e i confronti di impianti PV vengono effettuati in relazione alla resa energetica apparente. La distribuzione statistica della potenza di produzione e la tolleranza di produzione ($\pm t$) dovrebbero determinare la scelta del valore nominale dato dal fabbricante, così come il valore della potenza minima P_{min} . Le scelte e le strategie di marketing dei fabbricanti influenzano però i valori dichiarati.

Risulta quindi importante confrontare i valori reali con quelli dichiarati.

Le differenze tra i valori dichiarati dai fabbricanti e i valori misurati a STC sono riportate nella Tabella 6 – ultime tre colonne. I grafici Figura 25, Figura 26 e Figura 27, illustrano graficamente le differenze normalizzate alla potenza minima dichiarata (P_{min}).

Negli anni precedenti era relativamente facile confrontare il rispetto delle garanzie sulla potenza dei moduli perché tutte le garanzie erano riferite alla potenza nominale (P_n) e generalmente la garanzia era del $\pm 10\%$, solitamente variava unicamente la durata della garanzia. Attualmente, con l'introduzione dei limiti di tolleranza ($\pm t$ oppure P_{min}) nella dichiarazione della potenza nominale (P_n) e soprattutto con il riferimento della garanzia generalmente non più su P_n ma su P_{min} , risulta più difficile un confronto diretto.

Dalla Tabella 6 – ultime tre colonne, si nota delle differenze notevoli rispetto ai valori di potenza dichiarati **nominali**.

All'**acquisto**, la potenza iniziale, che è la potenza misurata e conosciuta dal fabbricante, dovrebbe essere superiore alla **potenza minima (P_{min})** dichiarata dallo stesso e cioè nella tolleranza di produzione rispetto alla **potenza nominale (P_n)**.

La **potenza iniziale P_a** dei moduli c-Si dei tre cicli è inferiore mediamente del **-6.8%** rispetto alla potenza nominale P_n . Le pubblicazioni e i controlli del LEEE-TISO sulla reale potenza acquistata dai fabbricanti e i controlli dei principali installatori su campioni di moduli negli impianti PV, ha permesso di ottenere, nel corso degli anni, dei significativi miglioramenti nella dichiarazione dei fabbricanti. Infatti se nel 2000 (ciclo 7) la differenza media era ancora del **-9.7%**, nel 2001 (ciclo 8) era già migliorata al **-7.1%**, mentre nel 2003 (ciclo 9) era già al **-3.3%**. Questo miglioramento è anche da attribuire alla diminuzione delle tolleranze di produzioni.

Nei precedenti sottocapitoli si è visto che la potenza misurata a STC dei moduli c-Si subisce una lieve diminuzione nel primo periodo di esposizione. Dopo di che risulta abbastanza stabile. Le esperienze acquisite negli ultimi 20 anni sugli impianti PV del LEEE-TISO, hanno mostrato una eccezionale stabilità della potenza erogata. La potenza stabilizzata dopo 15 mesi di esposizione è quindi da considerare la potenza a STC reale per i seguenti anni di produzione.

La differenza tra **potenza stabilizzata** dopo tre mesi di esposizione (P3) e la **potenza nominale** dichiarata dal fabbricante è mediamente del **-9.1%** (ultimi tre cicli). Si può comunque notare un miglioramento negli ultimi anni della differenza media P3-Pn dei moduli c-Si (differenza media del ciclo 7 = **-11.9%**; ciclo 8 = **-9.1%**; ciclo 9 = **-6.1%**).

Nel 2000 (ciclo 7), in 6 moduli su 13 (**46%**), la potenza stabilizzata **P3** è inferiore al 10% rispetto alla **potenza nominale Pn**. Nel 2001 (ciclo 8), lo era nel **55%** dei casi. Mentre nell'ultimo ciclo, P3 era inferiore del 10% rispetto a Pn in soli 3 casi su 12 (**25%**).

La differenza tra la potenza dopo 15 mesi di esposizione (**P15**) e la potenza nominale differisce di poco rispetto a quella descritta nel paragrafo precedente. Infatti normalmente le perdite di potenza nei successivi 12 mesi di esposizione (da P3 a P15) sono limitate, salvo qualche caso particolare (SW50T).

Dai grafici delle Figura 25, Figura 26 e Figura 27, si può notare come la potenza stabilizzata (pallino rosso) di quasi tutti i moduli collaudati, normalizzata rispetto alla potenza Pmin dichiarata, si situa tra la potenza minima Pmin e il valore Pmin-5%. In altre parole, la potenza reale durante i 25-30 anni di funzionamento dell'impianto è normalmente inferiore a Pmin.

Nel pronostico della resa energetica e quindi nel calcolo economico del costo dell'energia prodotta, è quindi più giudizioso utilizzare il valore della potenza minima dichiarata piuttosto che la potenza nominale.

Nelle figure descritte, il limite di garanzia è posto a -10% rispetto a Pmin. Ciò non è vero per tutti i moduli in esame. La pratica attuale dei fabbricanti si è spostata nel corso degli ultimi anni da una definizione rispetto a Pn ad una rispetto a Pmin. Moduli collaudati nel 2000 (ciclo 7) con una garanzia rispetto a Pn, nel 2003 venivano dati con una garanzia rispetto a Pmin. Di conseguenza risulta critico un confronto tra moduli collaudati in diversi anni, ed in un periodo di grandi modifiche nelle dichiarazioni di garanzia. La tendenza attuale è di definire la garanzia rispetto alla potenza minima Pmin.

Negli impianti fotovoltaici installati i moduli fuori garanzia devono essere sostituiti o rimborsati dal fabbricante. In pratica risulta difficile per il consumatore verificare la potenza reale dei moduli PV installati.

Come può un installatore di impianti fotovoltaici ottenere e controllare dei moduli con la potenza desiderata?

La potenza dichiarata Pn e i limiti di tolleranza di produzione (\pm oppure Pmin) devono corrispondere con un maggior grado di precisione alla realtà. Ciò è possibile unicamente mediante delle norme (standard) e dei controlli regolari delle performance dei moduli immessi sul mercato.

Inoltre alcuni fabbricanti non riportano direttamente i valori di garanzia sul datasheet del modulo né sull'etichetta del modulo. In un periodo di forte espansione del mercato dei moduli fotovoltaici, con i limiti di garanzia, per un identico prodotto, che sono modificati nel corso degli anni, risulta difficile risalire alla garanzia originale.

- Per alcuni tipi di moduli il limite di garanzia si situa a -20% di Pn.
- I riferimenti della garanzia sono spesso poco chiari o le dichiarazioni di garanzia non sono riportate direttamente sul datasheet del modulo.
- Per un pronostico della resa energetica è più giudizioso utilizzare il valore della potenza minima dichiarata (Pmin) piuttosto che la potenza nominale (Pn).

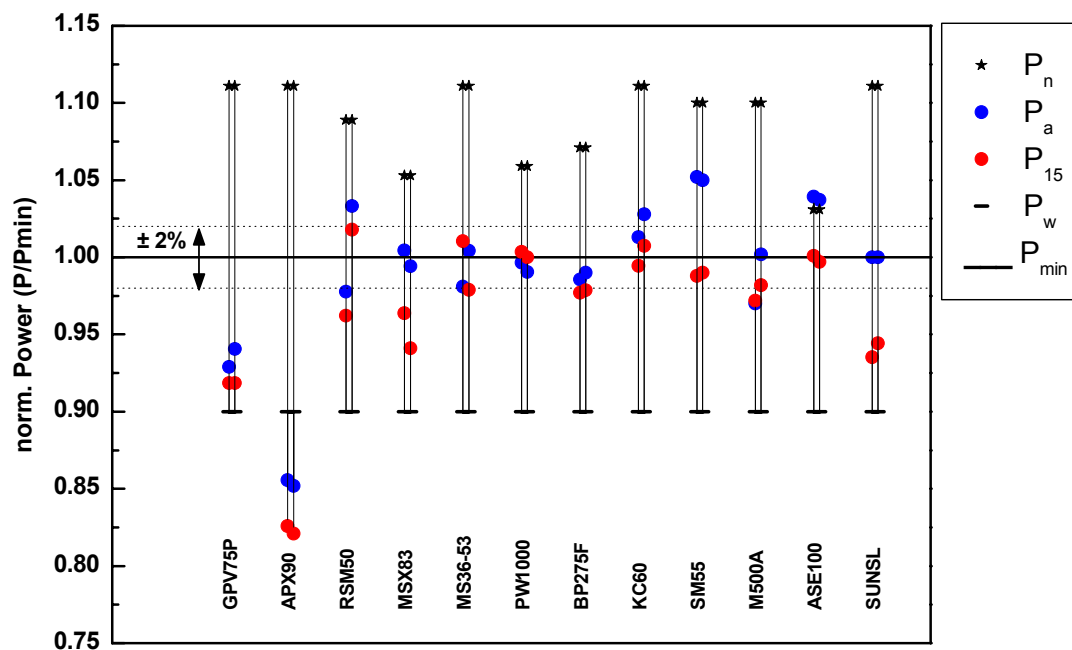


Figura 25: Potenza misurata normalizzata alla **potenza minima (P_{min})** dichiarata dal fabbricante; **ciclo 7.**
 P_w : potenza garantita dopo 10 anni di funzionamento (valore tipico).

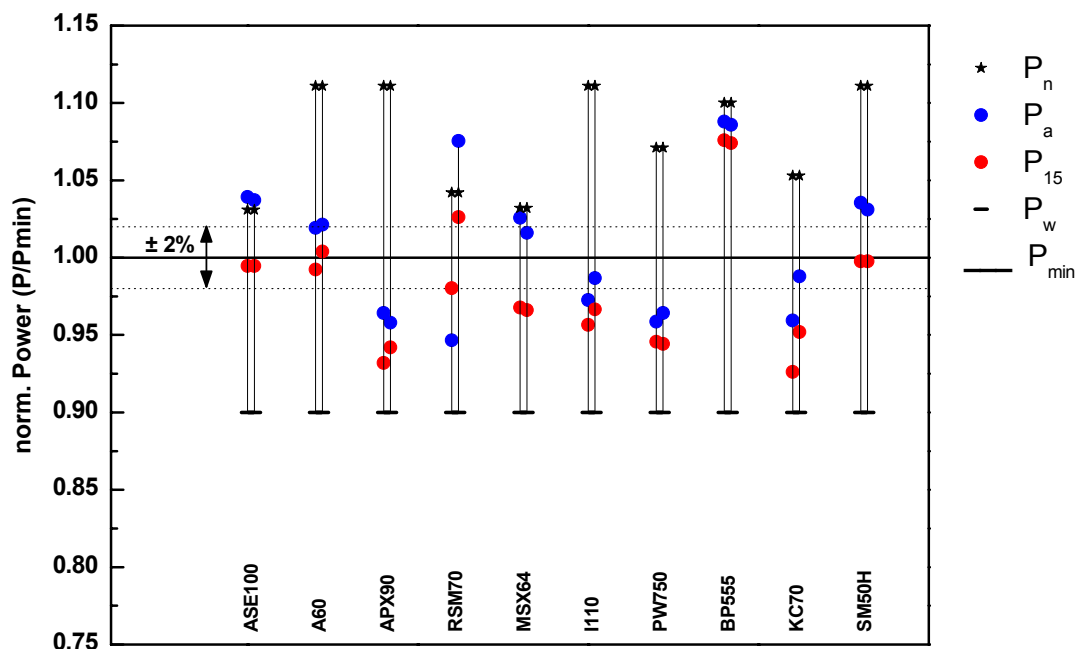


Figura 26: Potenza misurata normalizzata alla **potenza minima (P_{min})** dichiarata dal fabbricante; **ciclo 8.**
 P_w : potenza garantita dopo 10 anni di funzionamento (valore tipico).

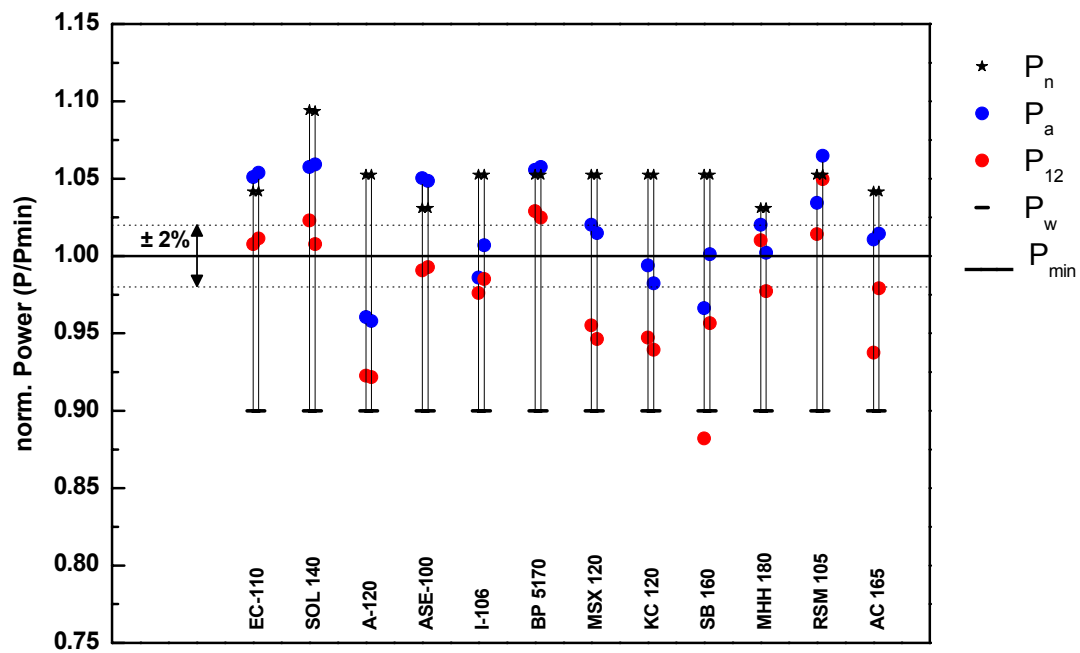


Figura 27: Potenza misurata normalizzata alla **potenza minima (Pmin)** dichiarata dal fabbricante; **ciclo 9**.
Nota: P12 = misure dopo 12 mesi di esposizione.

4.7.3 References

- [1] N. Cereghetti, E. Burà, D. Chianese, G. Friesen, A. Realini and S. Rezzonico; Power and Energy Production of PV modules Statistical considerations of 10 years activity, 3rd World PVSEC, Osaka, 2003.

4.8 Energia

La produzione di energia dipende, oltre che dall'insolazione annuale sul piano dei moduli, anche dalle condizioni climatiche generali: temperatura, vento, spettro solare, angolo d'incidenza dell'irraggiamento diretto, ecc.

I 18 tipi di moduli sullo stand di prova sono posizionati ad un Azimut -7° SUD, con una inclinazione di 45° . La struttura portante, montata su un tetto piano, permette la libera ventilazione dei moduli e forma un unico piano. L'irraggiamento incidente sul piano è misurato alle estremità del campo PV (Est e Ovest). La temperatura dei moduli è misurata sulla superficie posteriore del modulo sul retro di una cella del centro del modulo. La temperatura ambiente è misurata all'ombra del campo PV.

Alcune differenze possono sorgere a causa dell'altezza di fissaggio dei singoli moduli. La differente altezza può creare delle differenze di albedo nonché delle differenze di flussi d'aria attorno ai moduli con conseguente differente raffreddamento del modulo.

Fatte queste premesse, il confronto tra la produzione di energia annuale dei moduli, posti alle medesime condizioni climatiche, risulta quindi possibile.

Il confronto della resa energetica è effettuato in riferimento alla potenza e cioè è il confronto di Y_f (Final Yield), e viene espresso in [Wh/W]. Dove l'energia misurata è l'energia DC in uscita dal modulo, senza considerare il MPPT. Questo permette di confrontare moduli di potenza differente. Il confronto dei PR_{dc} (Performance Ratio) porta al medesimo risultato in quanto l'insolazione H_i è la medesima.

Tuttavia, come abbiamo visto nei sottocapitoli precedenti, la potenza reale stabilizzata non corrisponde alla potenza nominale, ed è semmai più vicina alla potenza minima dichiarata.

Il confronto della resa energetica può quindi riferirsi alla potenza reale stabilizzata (nel nostro caso a P_{15}), oppure alla potenza nominale dichiarata dal fabbricante.

Nei due casi si parlerà di:

1. **confronto tecnologico**, se Y_f (o PR) è riferito alla potenza reale stabilizzata (P_{15}).
2. **confronto commerciale**, se Y_f (o PR) è riferito alla potenza nominale.

4.8.1 Confronto commerciale della produzione d'energia

Il confronto più immediato per un utilizzatore o progettista è il confronto commerciale. Questo perché il riferimento per l'acquisto di un modulo è normalmente il costo per unità di potenza nominale (P_n), espresso in [CHF/Wp].

La potenza reale non corrisponde alla potenza dichiarata e il confronto commerciale include le decisioni di marketing dei costruttori riferite alla potenza nominale oltre al comportamento delle diverse tecnologie ad una data situazione climatica (vedi sottocapitolo seguente).

Ciclo 7:

Durante i dodici mesi del ciclo 7, l'insolazione incidente sul piano dei moduli H_i è stata di 1360 kWh/m^2 .

I moduli a film sottile (US64, ST40 e DS40) sono stati, sull'arco dell'anno, quelli con la miglior resa energetica (PR e Y_f). La loro produzione annua (espressa in PR nella Figura 28) rispetto alla potenza dichiarata ha superato quella degli altri moduli c-Si fino del 30%. Tuttavia le "normali" differenze estreme sono di circa il 20%.

I tre tipi di moduli con minor produzione (SW50T, APX90 e Sunslates) hanno avuto problemi particolari, riassunti qui di seguito:

- SW50T: il degrado è stato costante durante tutto il periodo in esame; un modulo si è rotto.
- APX90: la potenza iniziale dei moduli era già inferiore del 23.2% rispetto alla potenza nominale.
- Sunslates: le celle non sono ventilate posteriormente e quindi hanno una temperatura di funzionamento elevata; i connettori erano difettosi.

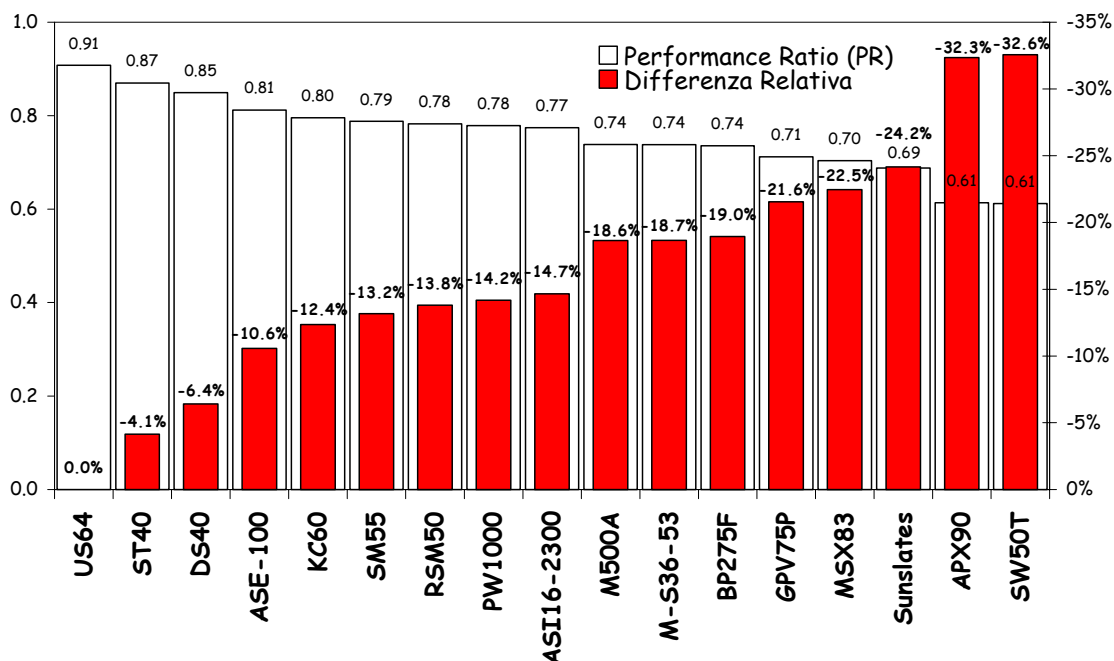


Figura 28: Performance ratio (PR_{dc}) annuale, rispetto alla potenza nominale dichiarata dal fabbricante, moduli del ciclo 7.

Le differenze relative (in %) sono calcolate rispetto al primo modulo alla sinistra del grafico.

Ciclo 8:

Durante i dodici mesi del ciclo 8, l'insolazione incidente sul piano dei moduli Hi è stata di 1522 kWh/m^2 .

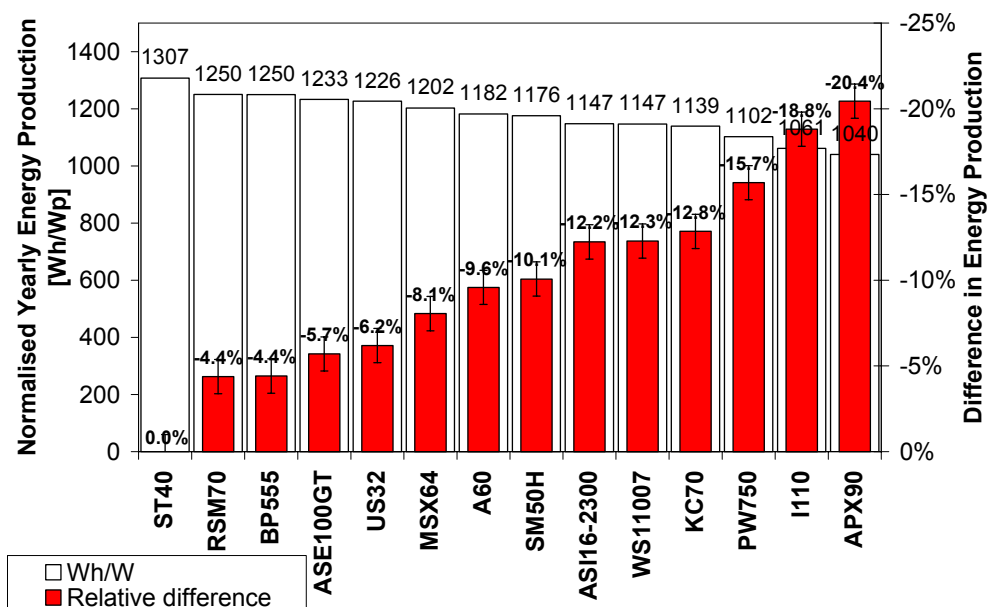


Figura 29: Produzione di energia (DC) e differenza relative rispetto alla potenza nominale dichiarata dal fabbricante (P_n), moduli del ciclo 8.

I tipi di modulo del ciclo 8 hanno differenze commerciali di produzione d'energia minori rispetto a quelli del ciclo 7. Come indicato nel precedente capitolo, le differenze tra i valori di potenza misurati rispetto a quelli nominali nei moduli del ciclo 8, sono migliorati, e questo ha contribuito ad ottenere delle differenze minori di produzione di energia.

Le differenze di produzione tra i vari tipi di moduli restano consistenti rispetto al ciclo 7, anche tra i soli moduli al silicio cristallino (fino al 16%).

Le differenze tra moduli dello **stesso tipo** (2 moduli per tipo) sono in media del 2%, con una precisione del $\pm 1\%$. Le differenze sotto il 3%, tra i vari tipi di modulo, non sono significative.

4.8.2 Confronto tecnologico della produzione d'energia

Per confronto tecnologico si intende il confronto della produzione d'energia normalizzata alla **potenza reale stabilizzata P15**. La misura della potenza reale P15 è effettuata con un simulatore solare a flash. La misura è accreditata ISO17025 unicamente per i moduli al silicio cristallino. Di conseguenza, nei grafici seguenti non sono riportati i moduli thin film.

Le differenze relative (in %) sono calcolate rispetto al primo modulo alla sinistra del grafico.

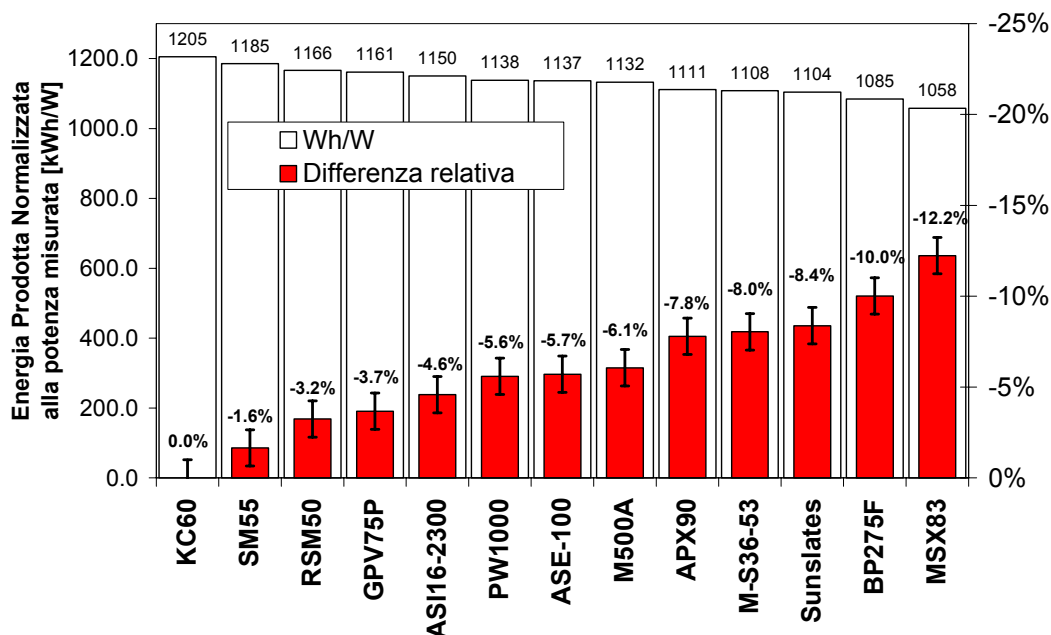


Figura 30: Produzione d'energia annuale, rispetto alla potenza misurata, per i moduli del **ciclo 7**.

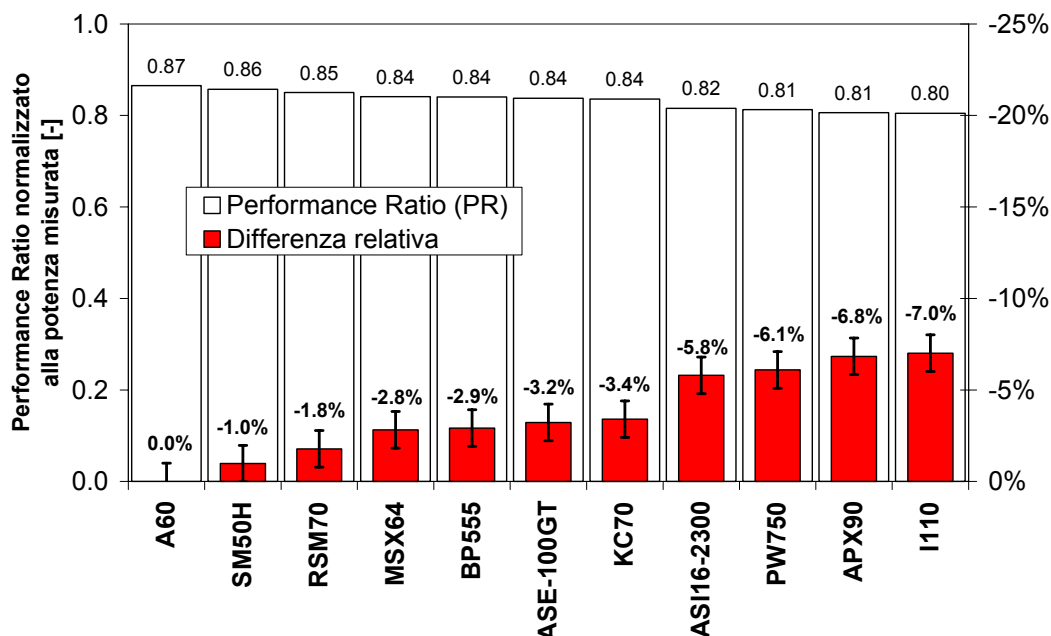


Figura 31: Performance Ratio (PR) annuale, rispetto alla potenza misurata, per i moduli del **ciclo 8**.

Le differenze relative (in %) sono calcolate rispetto al primo modulo alla sinistra del grafico.

Le differenze tecnologiche di resa energetica dei moduli al silicio cristallino, sono limitate ad un massimo di **7.0%**, e rispetto alla media di produzione del $\pm 3.5\%$. Le differenze riscontrate nel ciclo 8 sono minori rispetto a quelle riscontrate nel ciclo 7.

Le differenze di resa energetica dei moduli c-Si sono principalmente dovute al non-rispetto del fabbricante dei parametri di potenza dichiarati e solo secondariamente alle differenze tecnologiche.

Le differenze possono invece cambiare in funzione del tipo di montaggio, per esempio 'roof-mounted' invece che open-rack.

Le differenze sotto il 3%, tra i vari tipi di modulo, non sono significative. Si possono quindi suddividere i moduli del ciclo 8 in due gruppi di moduli: i primi 7 moduli con differenze $\Delta = 3.4\%$, e gli ultimi 4 moduli con differenze da -5.8% a -7.0% ($\Delta = 1.2\%$).

➤ Le differenze tecnologiche tra moduli c-Si sono contenute e sono comprese in un range di ca. $\pm 4\%$.

➤ Il fabbricante che dichiara una potenza nominale conforme alla potenza reale stabilizzata, con tolleranze di produzione piccole, risulta premiato con una resa energetica **superiore**, riferita alla potenza nominale.

➤ Nel corso degli ultimi cicli, si è riscontrato un miglioramento nelle dichiarazioni dei fabbricanti, e quindi ad una diminuzione dello scarto di produzione tra i fabbricanti.

Le misure di potenza reale dei moduli thin film, non accreditate ISO17025, indicano una migliore resa energetica rispetto ai moduli c-Si, sia per i moduli al silicio amorfo, sia per i moduli CIS (o CIGS). Per poter inserire i moduli thin film nel confronto energetico, sono in corso degli esperimenti per la definizione di una procedura di test indoor e outdoor, affidabile e paragonabile con i moduli al silicio cristallino.

4.9 Comportamento dei moduli in condizioni reali

Con il sistema di acquisizione dati che permette di misurare le caratteristiche elettriche a MPP dei moduli esposti outdoor sugli stand di misura è possibile studiare il comportamento dei moduli in condizioni reali. Si possono ricavare, ad esempio, il PR giornaliero, il PR giornaliero medio per ogni mese, l'indice di produzione Yf giornaliero medio, le matrici (1 min.) di potenza istantanea (vedi capitolo 4.9), quelle del PR istantaneo e anche del Yf istantaneo in funzione della temperatura ambiente T_a e dell'irraggiamento G per ogni tipo di modulo.

I dati giornalieri forniscono indicazioni di massima utili agli utilizzatori finali (aspetto pratico) e le matrici istantanee permettono di stabilire il comportamento dei moduli in funzione delle condizioni meteo registrate con il clima di Lugano e di valutare le differenze di comportamento fra modulo e modulo (aspetto scientifico).

Di seguito presentiamo una sintesi qualitativa di alcuni dati del ciclo 7 relativi agli indici PR e Yf; per le matrici di potenza si rimanda invece il lettore al capitolo 4.9, dove sono trattate in dettaglio.

DATI GIORNALIERI, sintesi dei risultati:

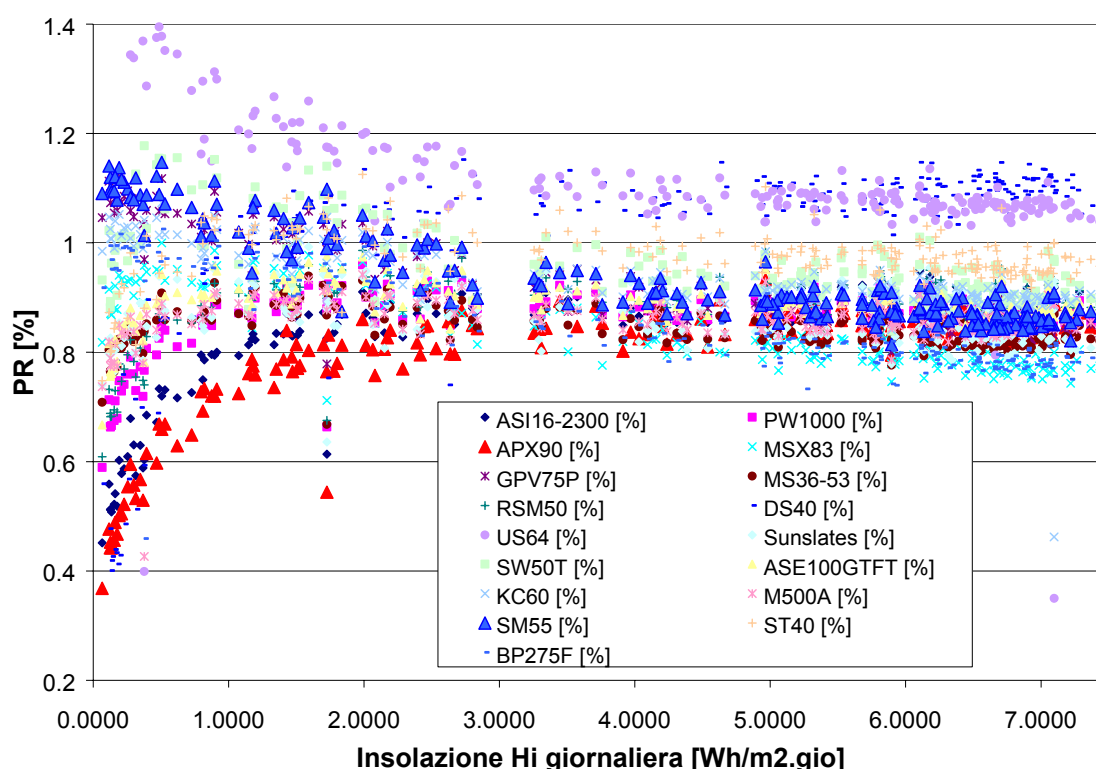


Figura 32: PR medio giornaliero dei moduli del ciclo 7, in funzione dell'insolazione totale giornaliera H_i sul piano dei moduli [Wh/m^2 giorno] riferito alla potenza effettiva P_{eff} .

Il PR giornaliero dei moduli dipende dall'insolazione giornaliera (Figura 32).

I moduli **c-Si** in giornate con insolazione $> 3 \text{ kWh/m}^2$ hanno un PR medio giornaliero simile di circa l' 87%. Al disotto di questo limite le differenze tra modulo e modulo si accentuano; in particolare per certi moduli il PR **aumenta** (es. SM55, GPV75P, ST50T), rispettivamente per altri **diminuisce** (es. APX90, ASI16-2300) bruscamente. Malgrado confronti precisi risultino difficili, è comunque possibile identificare alcuni moduli che sono sempre migliori (rispettivamente peggiori) di tutti gli altri a tutte le condizioni. Per es. i moduli SM55 ad alte insolazioni hanno un PR simile agli altri mentre a basse insolazioni il loro PR aumenta e supera il 100%. Anche i moduli APX90 sono un caso particolare e presentano un comportamento inverso: nei giorni di bassa insolazione il loro PR è molto basso, e tocca velocemente il 40-50%. L'andamento del $PR=f(H_i)$ di tutti gli altri moduli c-Si è quindi "compreso" tra la curva di SM55 (migliore degli altri per ogni H_i) e APX90 (peggiore degli altri per ogni H_i). Il PR del **modulo CIS** (ST40) ad alte insolazioni ($> 3 \text{ kWh/m}^2$) è migliore rispetto a quello dei c-Si, ed è di circa il 95%; a basse insolazioni il PR aumenta ed è analogo a quello di un buon c-Si (es. SM55).

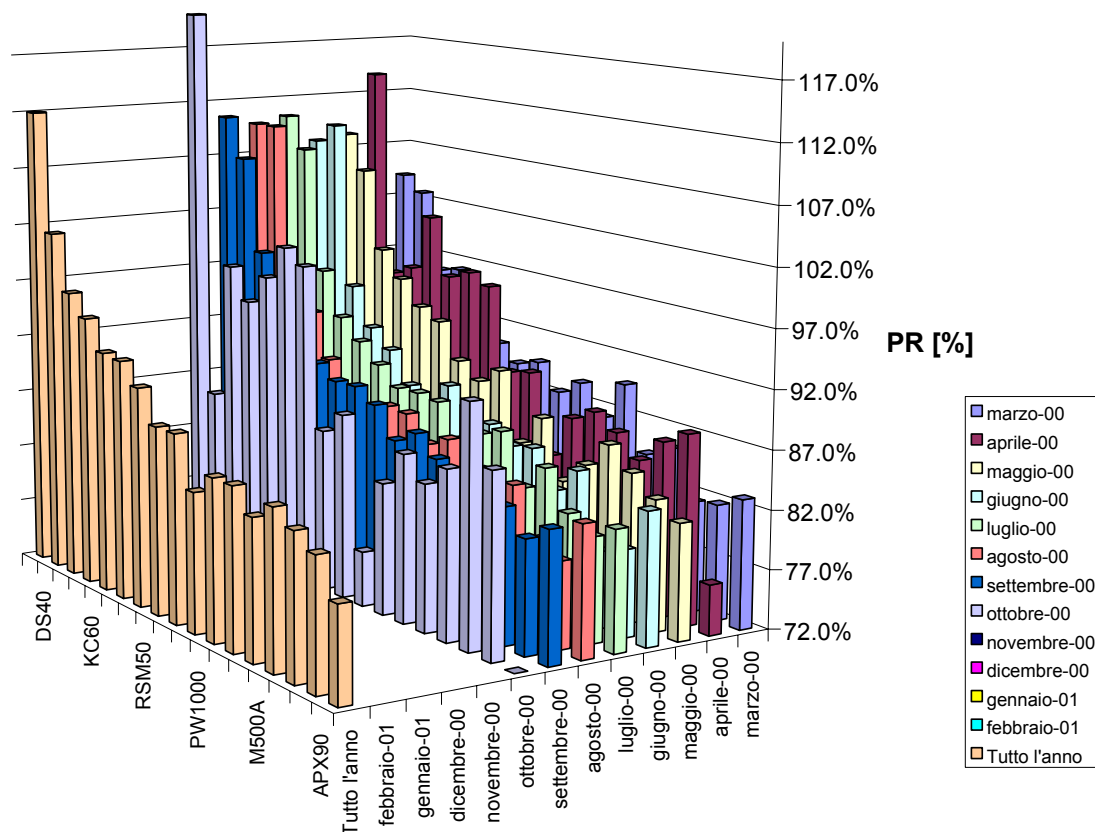


Figura 33: PR medio giornaliero di ogni mese riferito a Peff.

La "classifica" del PR dei moduli non è sempre la stessa, ma vi sono differenze notevoli da un mese all'altro (Figura 33).

Questa informazione è importante se un'installazione è utilizzata solamente durante un periodo limitato dell'anno (es. utilizzo soltanto invernale). Ciò è dato dal fatto che evidentemente l'insolazione (H_i) media giornaliera varia da un mese all'altro (nota: vi è una correlazione tra insolazione (bello, brutto tempo) e frazione di diffuso, vedi Figura 35).

Analizzando il comportamento mese per mese emerge, ad es., che il modulo APX90 si comporta particolarmente male nel corso dei mesi dove è stata registrata una bassa insolazione ma anche una frazione di diffuso elevata (brutto tempo). Nei mesi dove il % di diffuso è inferiore al 40-50%, APX supera invece altri moduli. Per es. APX si è classificato all'ultimo posto nei mesi di aprile e ottobre, ma in agosto ha superato 3 moduli (MSX83, BP275F, MS3653).

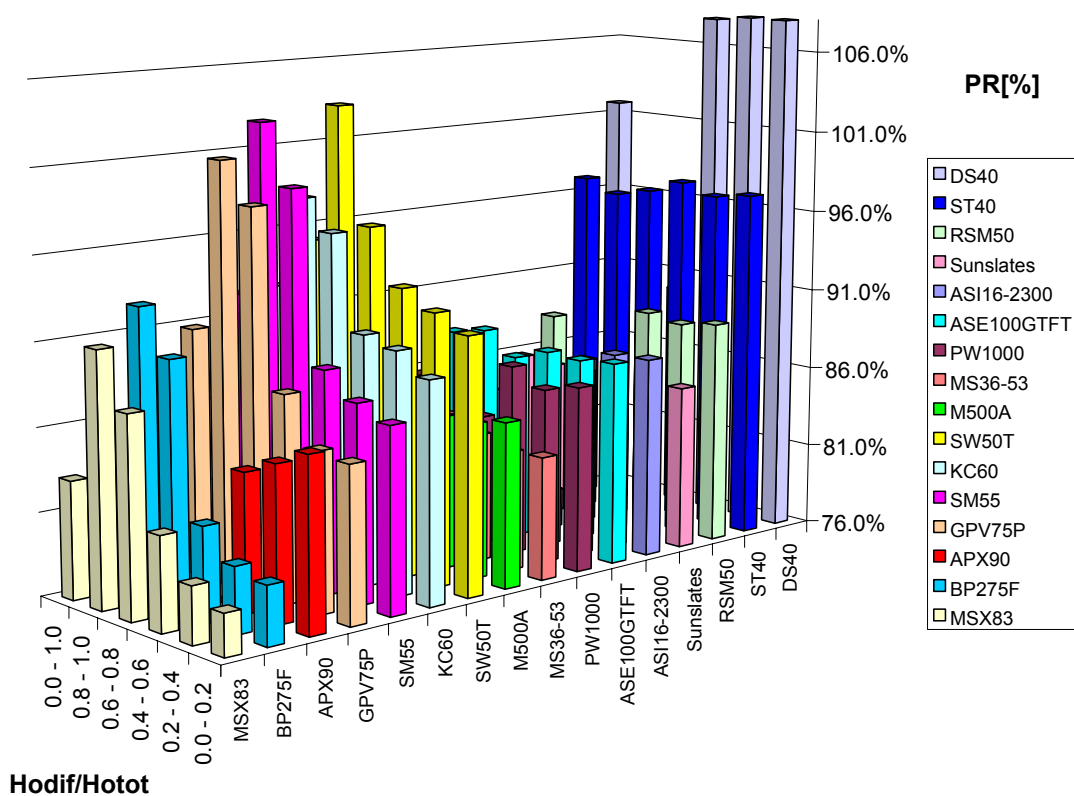


Figura 34: PR riferito a P_{eff} in funzione del tipo di giornata, caratterizzata dalla frazione di diffuso sull'orizzontale.

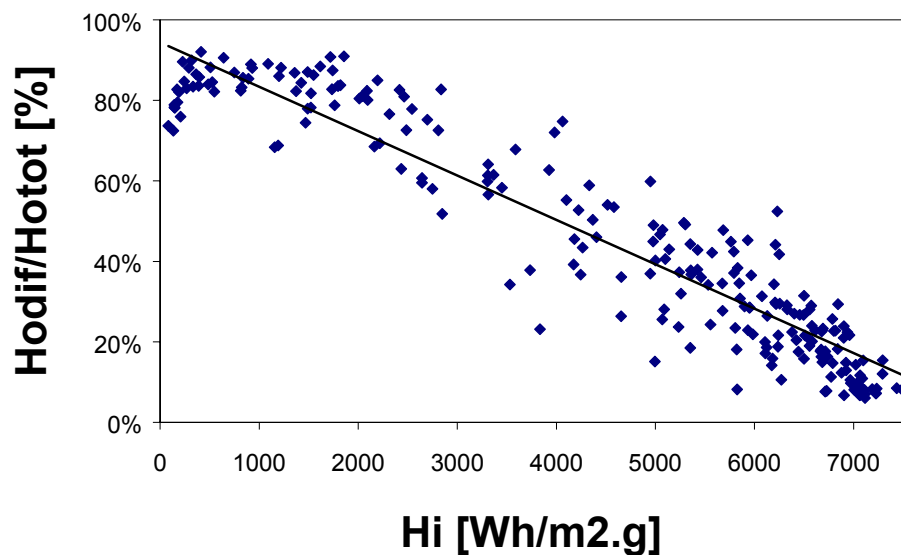


Figura 35: Relazione tra tipo di giornata (H_i insolazione giornaliera sul piano dei moduli) e tipo di luce (Hodif/Hotot).

- Il PR dei moduli dipende dalla frazione di diffuso (tipo di luce)
- I moduli si comportano in modo diverso: per alcuni il PR aumenta se aumenta la frazione di diffuso, per altri avviene il contrario.

Studiando il PR a seconda del tipo di luce, i moduli possono essere suddivisi in 4 gruppi:

- Moduli il cui PR **aumenta col diminuire** del % di diffuso (es. APX90), in modo **continuo**
- Moduli il cui PR **diminuisce col diminuire** del % di diffuso (es. MSX83), in modo **continuo**
- Moduli il cui PR è abbastanza costante e dipende poco dal % di diffuso (es. ASE, ST40)
- Moduli il cui PR è in generale abbastanza costante e dipende poco dal % di diffuso, ma cambia bruscamente in un determinato intervallo di Hdif/Htot (“es. DS40 **“buco”**”)

Attenzione: Le differenze di PR non sono dovute unicamente alla diversa frazione di diffuso, ma entrano in gioco in modo diverso anche altri parametri (G e T) che hanno un grosso influsso sul rendimento stesso.

Se si considera la produzione di energia si osserva che, per finire, le differenze tra modulo e modulo diminuiscono e non esiste più una differenza in comportamento a seconda della frazione di diffuso (come era il caso per il PR): in particolare, per tutti i moduli, la produzione aumenta con la diminuzione della frazione di diffuso giornaliero (giorni belli). La produzione dipende in modo preponderante dalla meteo, in particolare dalla distribuzione dell'energia ricevuta per ogni intervallo di G; l'intervallo che fa stato è attorno ai 930 W/m², dove l'energia ricevuta è **4 volte** maggiore all'energia giunta a 500 W/m², rispettivamente a 1040 W/m². I moduli amorfi e il CIS sono quelli più produttivi (DS40 4.79, US64 4.75, ST40 4.32 Wh/W).

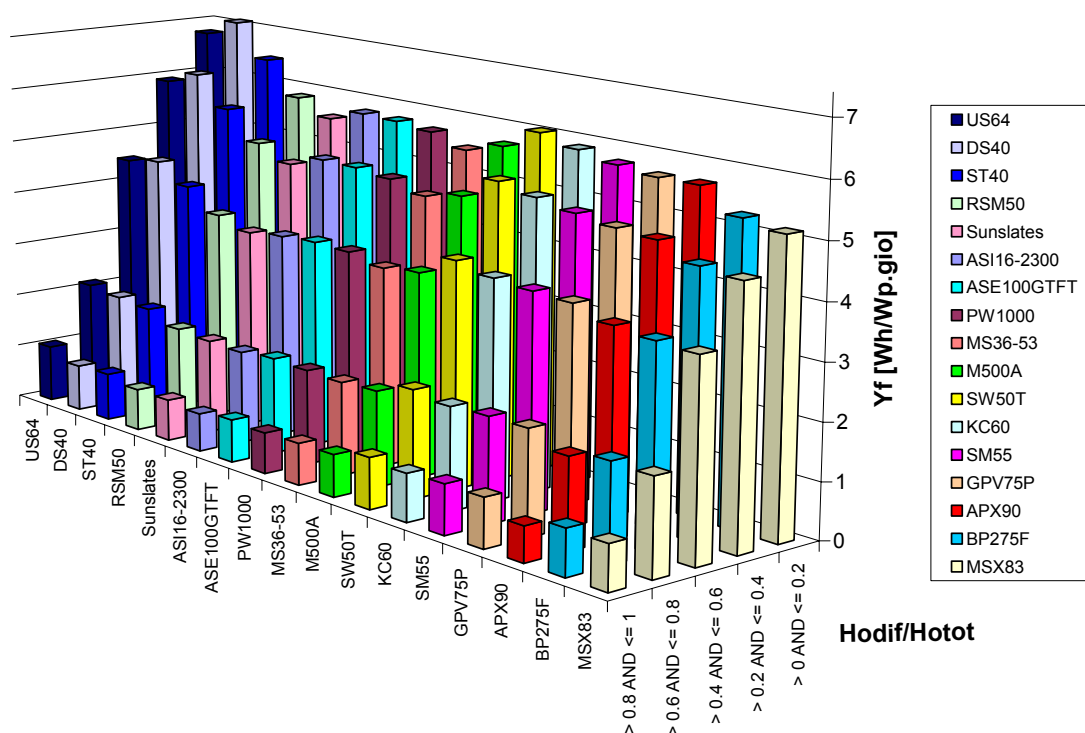


Figura 36: Produzione media giornaliera d'energia normalizzata Y_f [Wh/W.gio], riferita a P_{eff} in funzione del tipo di giornata (tipo di luce Hodif/Hotot).

$H_{o_{dif}} / H_{o_{tot}}$	Frazione di diffuso	Tipo di giornata
0.0-0.2	da 0 a 20 %	Bellissima giornata, cielo limpido
0.2-0.4	da 20 a 40%	Bella giornata
0.4-0.6	da 40 a 60%	Giornata abbastanza bella, a tratti nuvoloso
0.6-0.8	da 60 a 80%	Giornata con debole insolazione, nuvoloso
0.8-1.0	da 80 a 100%	Brutta giornata, molto nuvoloso
0.0-1.0	da 0 a 100%	Tutti i tipi di giornata

Tabella 7 : Significato della frazione di diffuso $H_{o_{dif}} / H_{o_{tot}}$, usata per caratterizzare il tipo di giornata (rapporto tra la componente diffusa e quella globale dell'insolazione giornaliera sul piano orizzontale). Vedi anche Figura 34, Figura 35, Figura 36, e Figura 37.

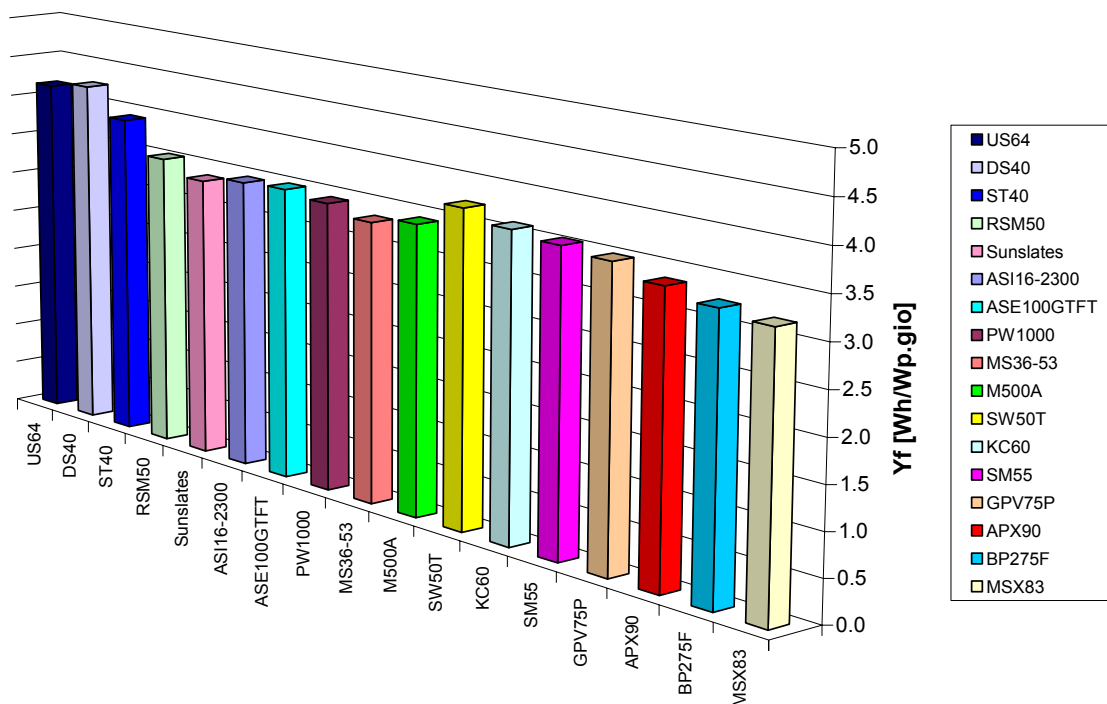


Figura 37: Produzione media giornaliera d'energia normalizzata Y_f [Wh/W.gio], riferita a P_{eff} , per tutti i tipi di giornata (cioè con H_{dif}/H_{tot} compreso tra 0 e 1). Valore medio: 3.56 Wh/Wp.gio

Indice di produzione Y_f :

- A differenza del PR, per l'indice Y_f non esiste più una differenza in comportamento a seconda della frazione di diffuso
- Per tutti i moduli, la produzione aumenta con la diminuzione della frazione di diffuso giornaliero (giorni belli). Vedi Figura 36
- Rispetto al PR, le differenze tra modulo e modulo sono inferiori (vedi Figura 37)

Moduli a-Si e CIS, considerazioni generali:

In generale il comportamento di questi moduli è molto buono (PR, Y_f).

I DunaSolar **DS40** mostrano il miglior P_{Reff} sia globalmente (fino ad ora $PR=101.7\%$), sia mensilmente per tutti i mesi salvo aprile e ottobre (brutto). Infatti essi soffrono il brutto tempo: nei mesi in cui il % di diffuso supera il 60%, il loro PR scende all'86%. I moduli **ST40 (CIS)** hanno anch'essi un ottimo P_{Reff} globale (96.9%), il terzo miglior PR dopo US64 e DS40. Al contrario di quest'ultimi, il loro PR è buono per tutti i tipi di giornata, cioè per tutti i tipi di H_{dif}/H_{tot} (vedi anche Figura 34). Anche rispetto alla **potenza dichiarata**, questi 2 moduli (DS40 e ST40) sono quelli che hanno il miglior PR globale.

Il comportamento dei moduli amorfi e CIS in generale è molto buono (PR, Y_f)

DATI ISTANTANEI, sintesi dei risultati:

Matrice del PR: $PR=f(G,T_a)$ [-]

Dalla valutazione dei dati istantanei (ogni minuto), sono state preparate le “matrici” del PR; esse permettono di stabilire come si comportano i moduli in funzione di ogni condizione meteo registrata (G_{inc} , T_a). La matrice del PR permette cioè di stabilire come varia il rendimento, qual è il rendimento massimo effettivamente raggiunto da ogni modulo e in che condizioni, ecc.

Questi grafici forniscono grossomodo la stessa informazione dei grafici del PR a partire dai dati giornalieri ma in più considerano l'influsso di T_a , e fanno intervenire l'effetto della radiazione solare a livello di dati istantanei (irraggiamento G_i e non insolazione H).

Si osservano gli stessi comportamenti emersi nei grafici dei dati giornalieri, in particolare:

- A bassi G per alcuni moduli il PR **diminuisce** (APX90, ASI) (Figura 38)
- A bassi G per alcuni moduli, al contrario, il PR **aumenta** (MSX83, SM55, GPV75P, ST50T, BP275F) (Figura 38)
- A G elevati per alcuni moduli (es. GPV75P, MSX83, SM55), il PR inizia a diminuire¹
- Per alcuni moduli il PR è abbastanza stabile (RSM50, KC60, ASE100, DS40, M500A)
- Per i moduli DS40 è visibile il “buco” (diminuzione veloce del PR a bassi G) (vedi Figura 39)
- Il modulo CIS ST40 ha un rendimento buono e costante: è elevato (PR 0,9-1,0) fino a $G=50W/m^2$ (vedi Figura 39).

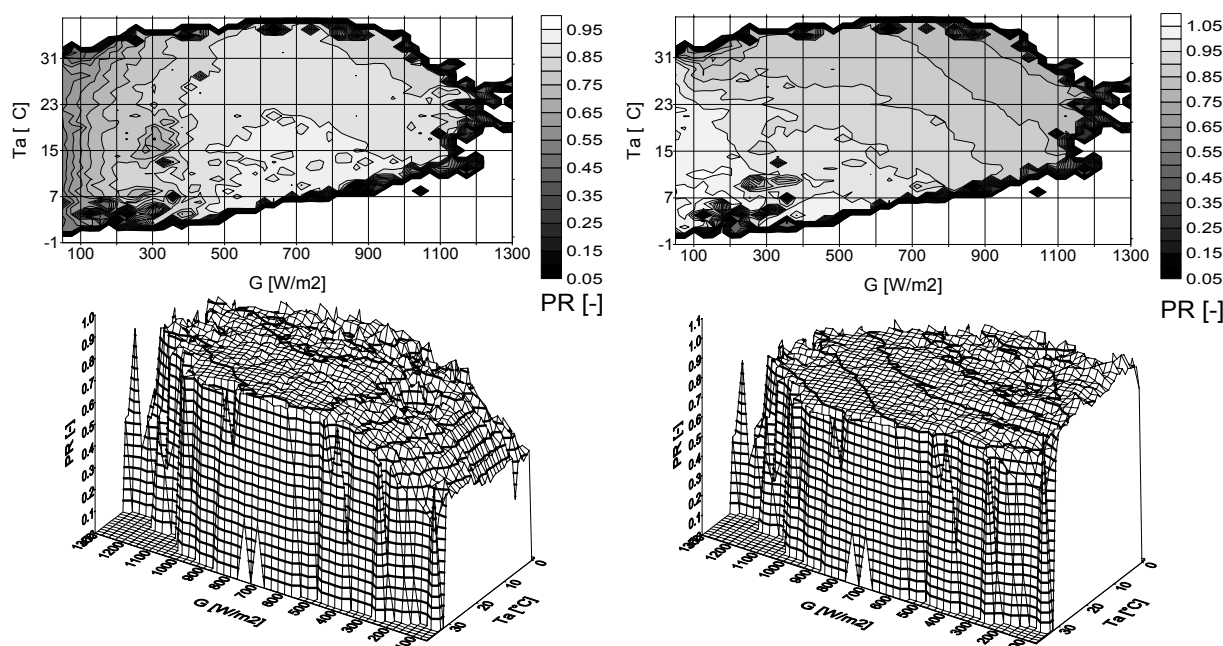


Figura 38: Matrice PR. Per il modulo APX90 (sinistra) il PR diminuisce a bassi irraggiamenti; per il modulo SM55 (destra) avviene il contrario.

¹ Le misure del rendimento dei moduli APX90 e SM55 effettuate in laboratorio fissando tutti i parametri a STC e facendo variare unicamente G mostrano che effettivamente la loro curva $\eta = f(G, T_c = cste)$ è diversa: questa funzione, per APX90 è sempre crescente; per SM55 invece presenta un **massimo verso 500-600 W/m²**. Già con una semplice correzione in temperatura del rendimento $\eta = f(G, T_a = cste)$ ricavato dalle misure outdoor si ottiene, per $G > 300 W/m^2$, la curva ottenuta in laboratorio. Per fare collimare le curve anche a G inferiori, occorre applicare una correzione più accurata che tenga conto in particolare dell'AM (importante a bassi G). L'effetto di massimo locale è confermato, ma in modo meno evidente, anche da PVSYSY qualora si aumenta il valore di R_s .

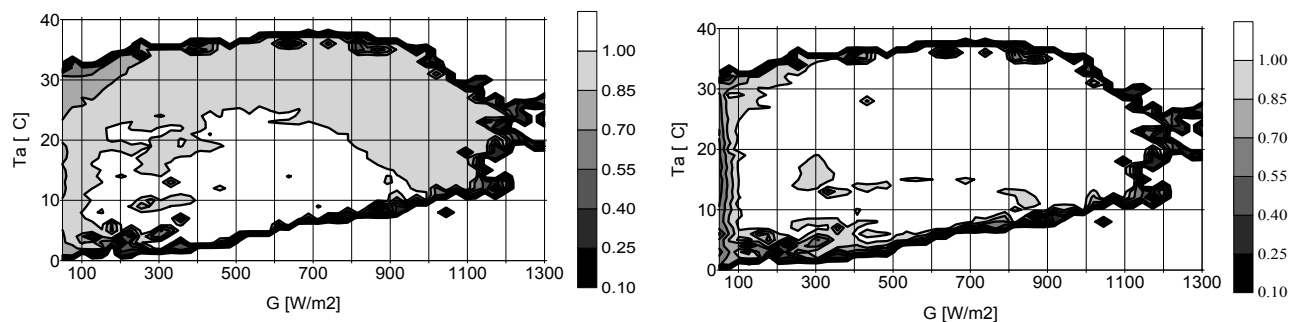


Figura 39: Matrice PR. Per il modulo ST40 (a sinistra) il PR rimane elevato e costante su tutto il range G e Ta; per il moduli DS40 (a destra) il PR è elevato ma diminuisce molto velocemente a G bassi.

Matrice di produzione: $Y_f=f(G,T_a)$ [Wh/W]

Le matrici di produzione esposte qua sotto sono state calcolate sul periodo marzo –novembre 2000. Anche se - a differenza ad es. delle matrici del PR- questi grafici cambieranno, cioè i valori aumenteranno col passare del tempo (cumulativi!), è stato possibile effettuare confronti e ricavare le seguenti considerazioni:

- Questi grafici presentano meno differenze da modulo a modulo rispetto ai grafici PR (grafici simili tra di loro)
- La produzione dipende dalla meteo: la zona dove arriva maggior energia è molto più importante (cioè la zona che fa stato è attorno ai 930W/m²) rispetto alle zone dove vi sono particolarità costruttive del modulo.
- La fascia 0.2-0.4 Wh/W rappresenta il valore più frequente di Y_f (cima montagna, colorazione prolungata). Per i moduli ASI e APX, questa zona non raggiunge la fine della montagna, confermando che a bassi irraggiamenti producono meno rispetto p. es. a SM55.
- Le punte di produzione (Wh/W) toccate –in questo periodo di misurazioni- sono le seguenti:
 - 3.2 - 3.4: DS40 a-Si
 - 3.0 - 3.2: US64 a-Si
 - 2.6 - 2.8: ST40 CIS
 -
 - 2.0 - 2.2: MSX83, BP275F

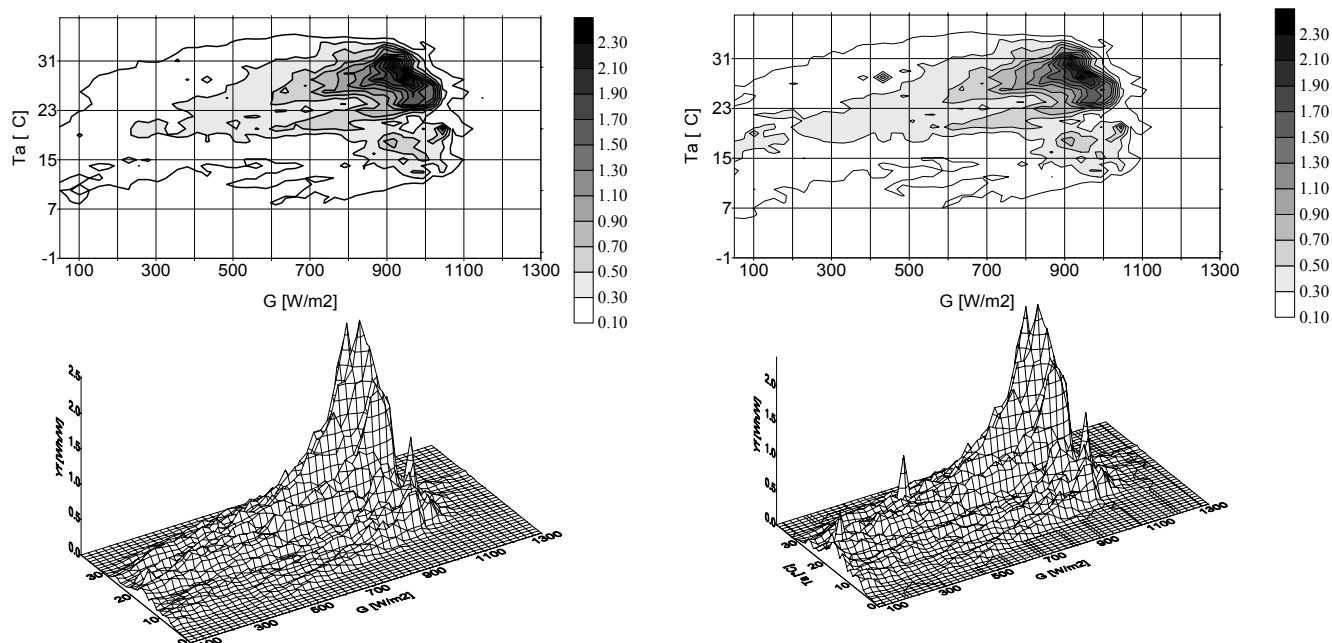


Figura 40: Matrici di produzione Y_f [Wh/W] per i moduli APX90 (a sinistra) e SM55 (a destra): le differenze tra i moduli sono meno evidenti rispetto a quelle delle rispettive matrici di potenza e PR.

- Le matrici dei dati istantanei confermano i risultati ricavati a partire dai dati giornalieri
- A bassi irraggiamenti per alcuni moduli il PR diminuisce, mentre per altri aumenta (vedi Figura 38)
- Per i moduli a-Si e CIS, il PR rimane elevato a quasi tutte le condizioni di irraggiamento (vedi Figura 39)

Osservazioni, difficoltà, limiti:

- I risultati esposti sono validi solo per i 17 moduli collaudati nel ciclo 7: risulta infatti difficile generalizzare troppo, in quanto moduli della stessa tecnologia si comportano in modo diverso (es. APX e MSX, entrambi p-Si).
- Inoltre un paragone preciso tra a-Si e c-Si è difficile, legato alla difficoltà della misura esatta della potenza a STC per i moduli a-Si. Tra l'altro il tipo US64 è un caso particolare, essendo rappresentato da 2 moduli fabbricati in periodi diversi. Nel corso della valutazione dei dati è stato considerato solo il modulo più recente.
- I risultati sono validi solamente per le condizioni meteo di Lugano, anno 2000, orientamento sud, inclinazione 45°.
- Le misure sono effettuate su un piano fisso. Ciò non ci permette di conoscere gli effetti dovuti a certi parametri, come per es. AM, angolo di incidenza e quindi riflessioni, frazione di diffuso vista dai moduli, eccetera (questi parametri non si possono isolare).
- Per il confronto dei moduli in termini di resa energetica (PR), occorre normalizzare i dati utilizzando la potenza fornita dal fabbricante (P_n) o quella effettiva (P_{eff}). Se si usa quest'ultima si possono introdurre errori legati al fatto che la potenza effettiva diminuisce nel tempo in modo non lineare (forte diminuzione iniziale). È per questo motivo che la procedura utilizzata in passato (misura di P_{eff} ogni 3 mesi) è stata modificata con l'inizio dei test solo a degrado avvenuto.

4.10 Pronostico della resa energetica con il metodo delle matrici

4.10.1 Introduzione

Oggigiorno il criterio principale per scegliere il tipo di modulo per la realizzazione di un impianto fotovoltaico è basato sulla potenza nominale dichiarata dal fabbricante. Tale potenza non dà alcuna informazione sulla qualità del modulo, né sulla reale energia prodotta da esso. Il semplice confronto delle potenze nominali non permette di determinare la resa energetica se non per mezzo di modelli fisici e/o matematici integrati in programmi di simulazione.

Purtroppo i programmi esistenti si basano su modelli sviluppati per tecnologie c-Si e penalizzano di conseguenza i moduli a film sottili che nella realtà possono raggiungere una produzione in kWh/Wp superiore a quella dei moduli c-Si (vedi Figura 28). Il confronto preciso della produzione d'energia da parte di moduli di differenti tecnologie necessiterebbe l'uso di modelli differenziati per ogni tecnologia ed implementati in un unico software. Oltre a questo svantaggio, i programmi oggi esistenti sono troppo complessi per un progettista o installatore. Questi programmi vengono utilizzati da chi li ha sviluppati o da un numero esiguo di esperti. Spesso i modelli matematici dei programmi necessitano un gran numero di informazioni sul modulo da simulare. Questo tipo di informazioni non sono facilmente reperibili sulle banche dati con i parametri dei singoli moduli presenti sul mercato e non sono quindi a disposizione di un semplice progettista.

Alcuni programmi si basano invece semplicemente sui valori nominali dichiarati dal fabbricante, ma come visto per il ciclo 7 e 8 (vedi Figura 25 e Figura 26) i valori di potenza nominale forniti dai fabbricanti non sono sempre corretti e di conseguenza non possono essere utilizzati per un calcolo preciso della produzione d'energia. Ai fini di un'analisi sommaria della tecnologia più adatta ad una data applicazione, un progettista necessita di indicazioni rapide e semplici da estrapolare.

Il LEEE-TISO sta attualmente sviluppando un metodo per il calcolo della resa energetica, denominato metodo delle matrici, che ha come obiettivo di permettere ad un progettista di pronosticare facilmente la produzione dei moduli da lui scelti e di valutare la tecnologia più adatta alla sua applicazione.

4.10.2 Descrizione del metodo

Il metodo delle matrici [1,2,3] è un strumento sviluppato appositamente per progettisti ed installatori. Con un minimo d'informazioni facilmente reperibili e con un foglio di calcolo (per es. excel), contenente una matrice di potenza del modulo e diverse matrici meteo, un progettista può calcolare la produzione d'energia di un modulo in diversi luoghi (Figura 41).

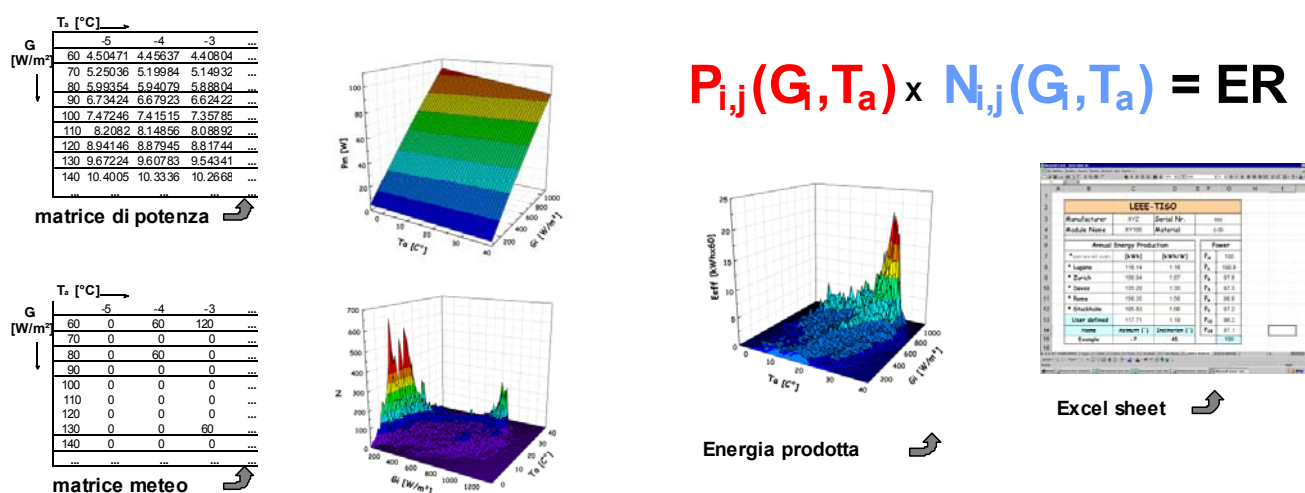


Figura 41: Illustrazione del metodo delle matrici utilizzando un applicazione Excel

$$matrice\ di\ potenza \times matrice\ meteo = resa\ energetica$$

Il metodo è stato sviluppato basandosi sulle misure effettuate sui moduli in collaudo al LEEE-TISO [4]. Per ogni modulo i parametri elettrici e meteorologici misurati ogni minuto durante un anno sono stati ridotti a due matrici: una matrice di potenza $P(G_i, T_a)$ e una matrice di distribuzione delle condizioni climatiche

$N(G_i, T_a)$ (matrice meteo), dove N è la frequenza dell'evento (G_i, T_a) durante il periodo considerato. La somma dei prodotti d'ogni punto della maglia delle due matrici ha come risultato l'energia prodotta durante l'anno.

Sostituendo la matrice meteo misurata con una qualsiasi matrice meteo di un altro luogo si può prevedere la resa energetica dello stesso modulo, ma montato in un luogo diverso, con condizioni d'irraggiamento e temperatura differenti. L'unica informazione di cui un progettista ha bisogno per poter calcolare la resa energetica del modulo sono i dati meteo mensili del luogo (irraggiamento sul piano orizzontale G_0 e temperatura ambiente T_a) e l'orientamento e l'inclinazione dei moduli. I dati meteo sono facilmente reperibili da una qualsiasi stazione meteorologica del luogo o da una banca dati come per esempio Meteonorm. La procedura completa per il calcolo della resa energetica e le matrici di potenza di tutti i moduli collaudati durante i cicli 7 e 8 saranno pubblicati sul sito www.lee-supsi.ch.

4.10.3 Informazioni ottenute con il metodo delle matrici

Il metodo delle matrici permette di ottenere diversi tipi d'informazione. La Tabella 8 mostra un esempio con i risultati di un calcolo della resa energetica.

LEEE-TISO				
Manufacturer	BP SOLAR	Serial Nr.	517950 S	
Module Name	BP555	Material	sc-Si	
Annual Energy Production			Power	
*open rack (45° south)	[kWh]	[kWh/W]	P_n	55
* Lugano	63.54	1.16	P_a	54.3
* Zurich	58.46	1.06	P_0	53.6
* Davos	73.37	1.33	P_3	53.7
* Rome	85.52	1.55	P_6	53.4
* Stockholm	57.76	1.05	P_9	53.7
User defined	0.00	0.00	P_{12}	53.8
Name	Azimuth [°]	Inclination [°]	P_{15}	53.7
				55

Tabella 8: Esempio di risultati ottenuti con il metodo delle matrici

La prima colonna, in “annual energy production”, rappresenta la resa energetica in kWh di un determinato modulo calcolato per vari luoghi. Oltre a città di diverse zone climatiche del nord, sud, centro Europa e di un tipico clima montano, il progettista può calcolare la resa energetica per un luogo da lui definito (user defined). Le esigenze cambiano in dipendenza del tipo di utente. Un utente di un impianto collegato in rete è principalmente interessato alla resa annuale, mentre un utente di un impianto autonomo è più interessato alla resa giornaliera. Le città scelte in questo esempio rappresentano delle specifiche aree geografiche, ma in dipendenza delle necessità possono essere rimpiazzate da dati meteo che rappresentino altre città o giorni tipici, come per esempio: soleggiato/caldo, soleggiato/mite, soleggiato/freddo, nuvoloso/caldo, nuvoloso/mite, nuvoloso/ freddo. Per i luoghi predefiniti nel software i risultati sono validi per un modulo inclinato a 45° e orientato verso sud. Nel caso del calcolo della produzione per un luogo definito dall'utente l'azimut e l'inclinazione possono variare in dipendenza dell'installazione prevista. Attualmente tutte le previsioni di resa energetica si limitano a moduli montati su una struttura open-rack. Il calcolo della resa energetica per diversi tipi di montaggio è in fase di studio (vedi capitolo 4.10.8).

La resa energetica in kWh ottenuta dai calcoli dà informazioni sull'energia prodotta da un modulo in un anno, ma non permette ancora di valutare quale sia il miglior tipo di modulo per l'applicazione desiderata dal cliente. Per poter confrontare tra di loro i diversi tipi di moduli e di tecnologie sul mercato è necessario confrontare l'energia prodotta per unità di potenza installata [kWh/W]. A questo proposito sotto la colonna “power” si trova sia la potenza dichiarata dal produttore (P_n) che le potenze STC realmente misurate durante un anno di funzionamento del modulo (P_a a P_{15}) (vedi capitolo 4.6 Misure di Potenza). Con queste

informazioni l'utente può scegliere per quale unità di potenza valutare la produzione. La resa energetica in [kWh/W] varia in dipendenza della potenza inserita nella casella azzurra della Tabella 8.

Se la resa energetica viene valutata in relazione alla potenza nominale dichiarata dal produttore allora il progettista può farsi un'idea di quale modulo renda di più per Watt acquistato, il [kWh/W] può essere interpretato come kWh/€. In questo tipo di confronto bisogna però rendersi conto che le potenze dichiarate dal fabbricante non sono sempre corrette e che possono variare nel tempo come lo può fare il prezzo.

In genere si ha a disposizione solo la potenza nominale del modulo ma se, come nel caso della Tabella 8, si ha anche la potenza misurata da un laboratorio, si può confrontare la resa energetica in relazione alla potenza reale. In tale modo si fa un vero confronto tecnologico e non d'acquisto, come nel caso precedente.

In genere per questo tipo di confronto è consigliato usare la potenza stabilizzata del modulo (P_{15}) (vedi capitolo 4.7).

Oltre all'energia totale prodotta il file excel permette di visualizzare un'altra informazione utile in fase di progettazione, l'energia prodotta in funzione della potenza di funzionamento dei moduli.

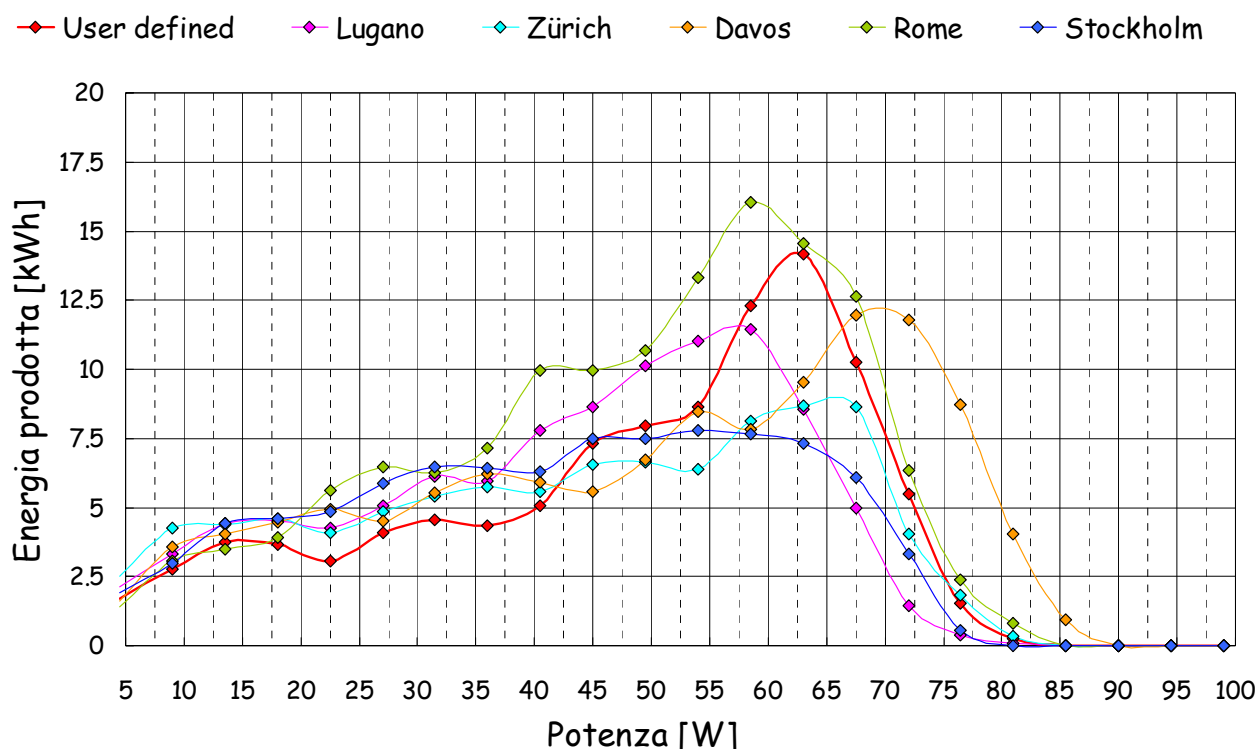


Figura 42: Energia prodotta durante un anno in funzione della potenza di funzionamento

Nell'esempio riportato in Figura 42 si vede come in montagna (Davos) si osserva una maggiore produzione a potenze elevate di funzionamento rispetto allo stesso modulo installato a Roma, dove le temperature sono molto più elevate. Con queste informazioni le caratteristiche e la dimensione dell'ondulatore possono essere calibrate in base al comportamento di un dato tipo di modulo alle condizioni climatiche di ogni singolo luogo. Un progettista ha così la possibilità di ottimizzare il rendimento complessivo dell'impianto PV.

La Figura 43 rappresenta la potenza di funzionamento dei moduli del ciclo 7. In essa si può vedere con quale frequenza nel corso di un anno a Lugano i moduli raggiungono una certa percentuale della potenza nominale. Il grafico mostra come la potenza istantanea non ha mai superato, o solo per una piccola frazione del tempo, il 75-80% della potenza nominale P_n . Per i moduli a-Si e CIS questo limite è leggermente superiore. La potenza nominale non è mai stata raggiunta (cioè non si ha mai avuto $P_{eff}/P_n=100\%$), nemmeno durante condizioni di lavoro particolarmente favorevoli (es. $G > 1000 \text{ W/m}^2$ e basse temperature). L'informazione data da questi grafici dimostra che nella maggior parte dei casi la scelta di un ondulatore dalla potenza nominale pari all'80% di quella del campo non è affatto azzardata, ma presenta 2 vantaggi: risparmio finanziario sull'ondulatore e ondulatore caricato in modo più efficiente.

Attenzione è però richiesta nel caso in cui un produttore di un ondulatore consiglia di non caricare al massimo l'ondulatore a causa del rischio di diminuire il tempo di vita dell'inverter.

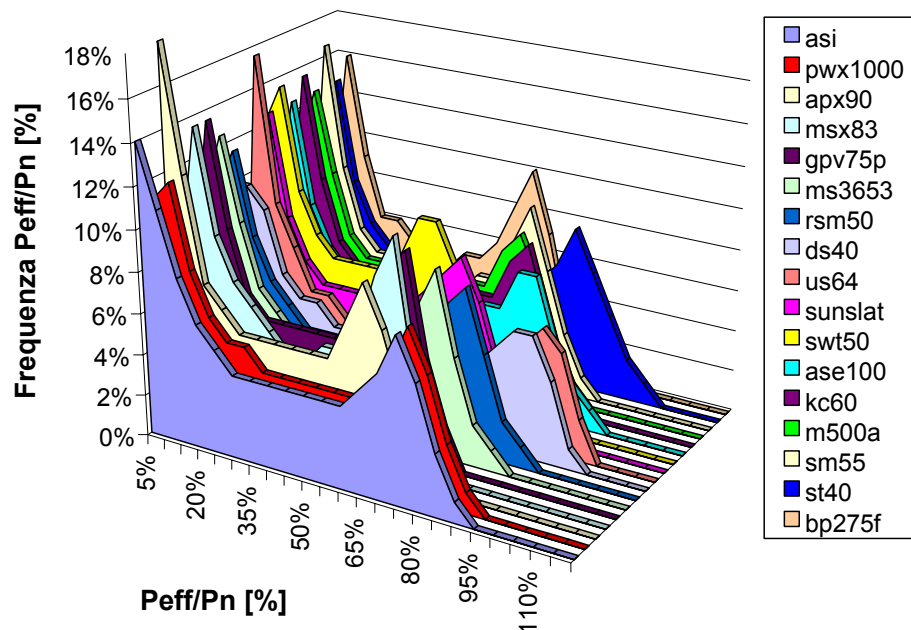


Figura 43: Frequenza della potenza effettiva P_{eff}/P_n (normalizzata) erogata dai moduli del ciclo 7

4.10.4 La misura delle matrici

I metodi per misurare le caratteristiche elettriche del modulo a diverse temperature ed irraggiamenti sono principalmente tre. La misura outdoor su una struttura fissa (1), la misura su un inseguitore solare (2) e la misura indoor con un simulatore solare (3). Fino ad ora il LEEE-TISO ha praticato il primo metodo, la misura outdoor su una struttura fissa. Confronti con laboratori che usano gli altri due metodi [5,6,7] sono in corso (vedi capitolo 4.10.9) e serviranno come studi preliminari per l'implementazione di essi nel nostro laboratorio. Ognuno dei metodi è contraddistinto da vantaggi e svantaggi, che sono illustrati in dettaglio nella Tabella 9.

METODO	VANTAGGI	SVANTAGGI
1	<ul style="list-style-type: none"> - condizioni reali (MPPT, outdoor) - possibilità di misurare un grande numero di moduli simultaneamente - misura dell'energia prodotta a condizioni reali 	<ul style="list-style-type: none"> - durata delle misure: 1 mese (c-Si, CIGS) 1 anno (a-Si)
2	<ul style="list-style-type: none"> - durata delle misure ridotta a circa 1-2 settimane - numero elevato di condizioni climatiche in un corto periodo 	<ul style="list-style-type: none"> - non adatto per silicio amorfo (variabilità nel tempo) - costo sistema - posto limitato sul sun-tracker
3	<ul style="list-style-type: none"> - durata delle misure ridotta a circa 1-2 settimane (1 giorno se si conosce già il valore NOST) - buona ripetibilità (STC) 	<ul style="list-style-type: none"> - ulteriore misura outdoor: NOST* (vedi capitolo...) per la trasformazione della matrice $P(G_i, T_{cell})$ a $P(G_i, T_a)$ - possibili errori di misura dati dal simulatore solare (effetti capacitivi, misure a diversi irraggiamenti, ecc.) - tecnologie non misurabili sotto luce pulsata (multi giunzioni, silicio amorfo, ecc.)

Tabella 9: Confronto dei metodi per la misura di una matrice di potenza di un modulo (1: outdoor su struttura fissa, 2: outdoor su un sun-tracker, 3: indoor con un simulatore solare)

Il metodo 1, quello principalmente utilizzato dal LEEE-TISO, viene eseguito sugli stand. Su cosa e su come i moduli dello stand vengono misurati è descritto in dettaglio nel capitolo 4.4. I vantaggi di questo tipo

di misura sono: le condizioni ambientali reali e il funzionamento a condizioni paragonabili ad un sistema PV collegato alla rete. I parametri elettrici e meteorologici misurati sono: I_m , V_m , P_m , G_i , G_o , G_{diff} , T_a e T_{bom} (temperatura misurata sul retro del modulo - “Back Of the Module”). Una volta misurati, i dati vengono ridotti a matrici di dimensioni 0 a 1300 W/m^2 e -20 a 40°C se si considera la temperatura ambiente, oppure -20 a 80°C se si considera la temperatura del modulo. I dati con irraggiamento inferiore a 45 W/m^2 non vengono presi in considerazione. La grandezza della maglia generalmente utilizzata è di $10 \text{ W/m}^2 \times 1^\circ\text{C}$. Le matrici estratte dai dati misurati sullo stand sono:

- la matrice di corrente del punto di massima potenza $I_m(G_i, T)$
- la matrice di tensione del punto di massima potenza $V_m(G_i, T)$
- la matrice di potenza $P_m(G_i, T)$
- la matrice di energia prodotta $E(G_i, T)$
- la matrice del numero di eventi di condizioni climatiche $N(G_i, T_a)$
- la matrice della standard deviation di P_m , I_m , V_m $StDev(G_i, T_a)$

La Figura 44 illustra una finestra del software sviluppato appositamente per l'elaborazione dei dati.

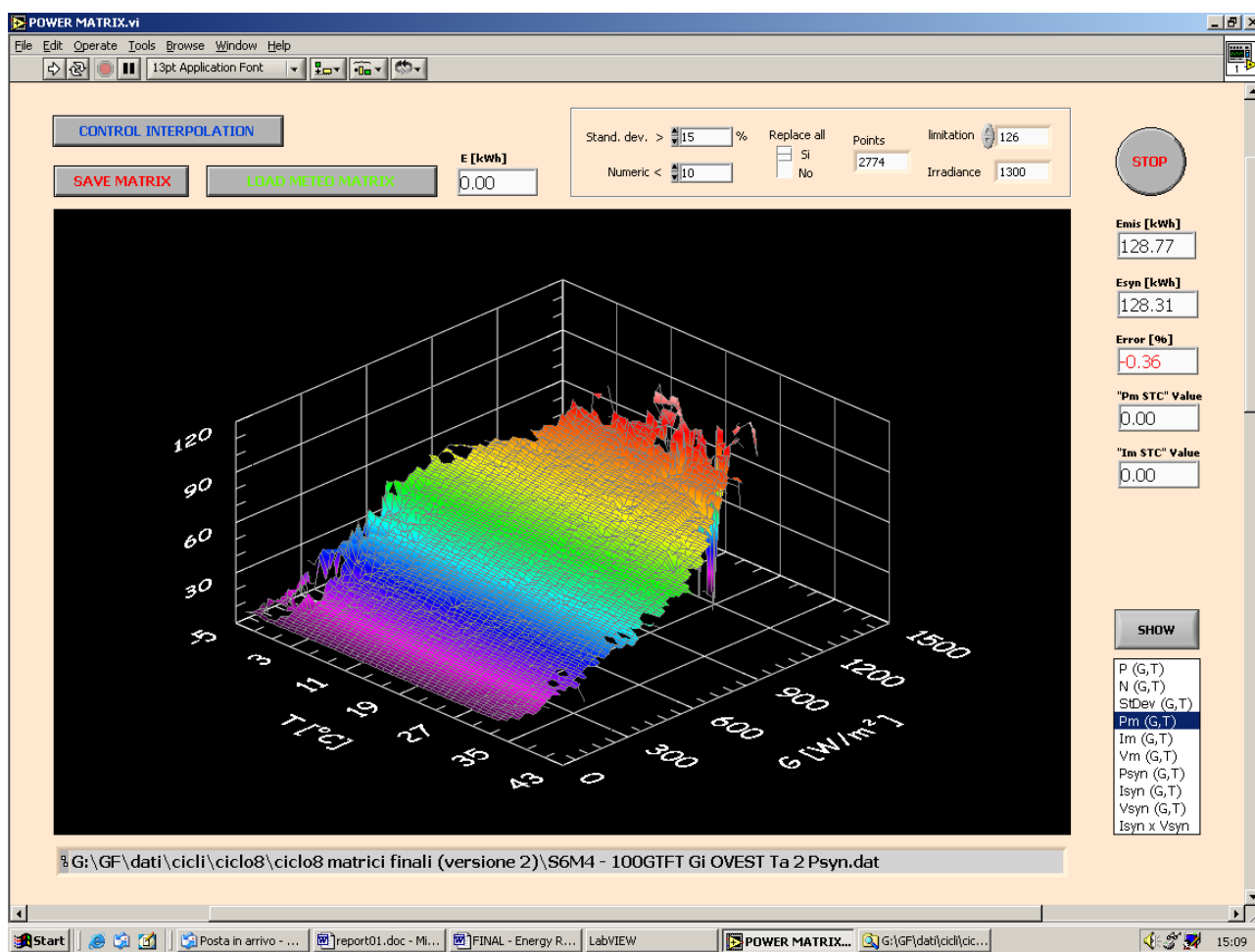


Figura 44: Software sviluppato per l'elaborazione delle matrici misurate con l'esempio di una matrice di potenza.

4.10.5 La matrice di potenza

Ogni modulo è caratterizzato da una sua matrice di potenza $P_m(G_i, T_a)$, dove ogni punto rappresenta la potenza erogata dal modulo ad una certa condizione climatica (G_i, T_a). La Figura 45 (a) è un esempio di una matrice di potenza estratta dalle misure eseguite sullo stand. Ogni punto di questa matrice equivale alla media delle potenze misurate ad una certa condizione climatica (G_i, T_a). Per poter calcolare la resa energetica di un modulo montato in un qualsiasi luogo, bisogna conoscere i valori di potenza per tutte le possibili condizioni climatiche. Data la limitatezza delle condizioni climatiche del luogo di misura e della durata delle misure non è però possibile ottenere tutte le condizioni climatiche. Inoltre, a causa delle misure a condizioni reali, e di conseguenza delle variazioni del vento, dello spettro solare, dell'angolo d'incidenza o un passaggio improvviso di nuvole, la superficie della matrice risulta imperfetta. Per ottenere una matrice, come quella di Figura 45 (b), adatta per il pronostico della resa energetica, i dati misurati devono essere interpolati ed estrapolati al range di condizioni climatiche desiderate.

L'elaborazione dei dati consiste prima di tutto nell'eliminazione dei punti causati da errori d'acquisizione dati o da dati ottenuti in condizioni climatiche estreme o talmente instabili da non permettere al modulo di stabilizzarsi. Vari studi hanno dimostrato che nel nostro caso (dati acquisiti ad intervallo di 1 minuto) i risultati migliori si ottengono eliminando tutti i punti con una deviazione standard (StDev) superiore al 15-20% ed un numero di eventi (N) in un anno inferiore a 2-10. Il filtro scelto può variare in dipendenza del numero di dati disponibili e alla qualità dei dati.

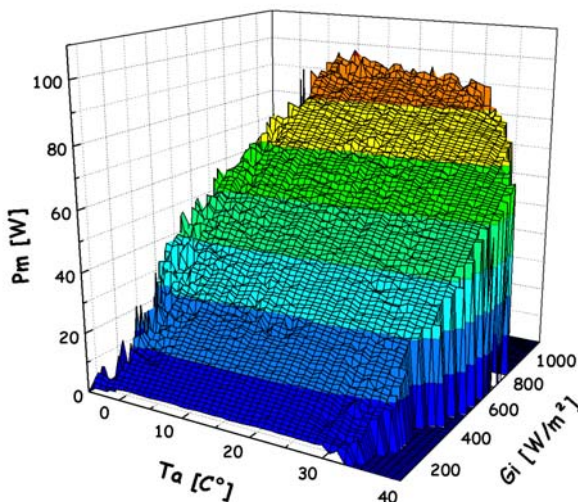
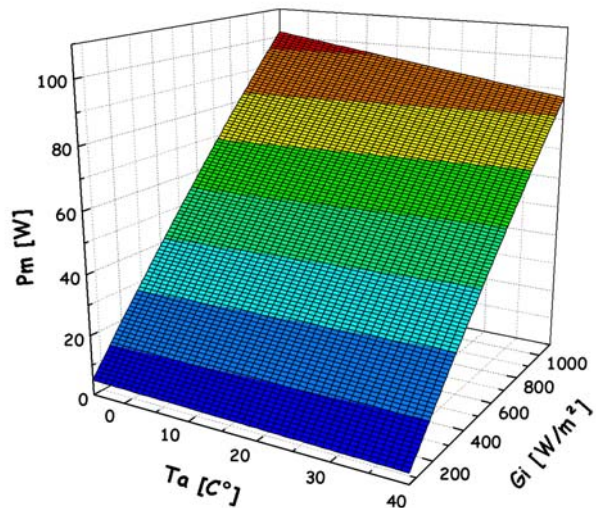
Figura 45: (a) Matrice di potenza misurata

Il passo successivo consiste nell'interpolazione dei dati che può essere fatta mediante modelli matematici o fisici. Diversi metodi sono stati presi in considerazione.

Il primo consiste nell'interpolazione lineare dei dati a irraggiamento costante (coefficienti di temperatura) e successivamente nell'interpolazione lineare o quasi-lineare a temperature costanti (dipendenza dall'irraggiamento).

Il secondo consiste invece nel fit dei dati con delle equazioni semi-empiriche basate su un modello elettrico equivalente con un diodo.

Il modello così detto lineare è risultato il meno adatto siccome l'utilizzatore ha bisogno di ricevere



tutti i punti della matrice di potenza per poterla combinare con una matrice meteo. Invece nel caso del metodo basato su delle equazioni l'utente può calcolare la potenza per ogni punto e di conseguenza crearsi la matrice a suo piacimento. Il metodo lineare ha inoltre dimostrato di essere insufficiente nel caso di dati di scarsa qualità o di pochi dati. Il poter fittare la matrice con un minor numero di dati è però importante per poter ridurre il tempo di misura a un minimo indispensabile e di conseguenza poter misurare una quantità maggiore di tipi di moduli.

Il secondo metodo, qui in seguito descritto, è risultato essere molto più preciso e adatto a fittare un minor numero di dati. Il metodo si basa sulle due equazioni seguenti che sono state ottenute dopo una semplificazione delle equazioni pubblicate dal Sandia National Laboratory [8,9]. Le equazioni originali sono state ridotte alla semplice dipendenza dai due fattori più importanti, l'irraggiamento G_i e la

temperatura ambiente T_a , ignorando di conseguenza la dipendenza della potenza dall'airmass (AM), dall'angolo d'incidenza (AOI) e dal vento. Le equazioni sono descritte da:

Equazione 5 $I_m = I_{m,sc} \cdot G_i / 1000 \cdot [1 + \alpha_{Im} \cdot (\Delta T \cdot G_i / 1000 + T_a - 25)],$

Equazione 6 $V_m = V_{m,sc} + C_0 \cdot \ln(G_i / 1000) + C_1 \cdot (\ln(G_i / 1000))^2 + \beta_{Vm} \cdot (\Delta T \cdot G_i / 1000 + T_a - 25),$

dove:

- $I_{m,sc}$ corrente al punto di massima potenza a condizioni STC,
- α_{Im} coefficiente di temperatura di I_m a 1000 W/m^2 ,
- ΔT differenza di temperatura $T_{cell} - T_a$ a 1000 W/m^2 e funzionamento del modulo al punto di massima potenza,
- $V_{m,sc}$ tensione al punto di massima potenza a condizioni STC,
- C_0, C_1 parametri del modulo,
- β_{Vm} coefficiente di temperatura di V_m a 1000 W/m^2 ,
- T_a temperatura ambiente,
- G_i irraggiamento incidente sul modulo.

La procedura per la creazione della matrice consiste nell'interpolazione separata della corrente $I_m(G_i, T_a)$ e tensione $V_m(G_i, T_a)$ ottenute dalle misure. La matrice di potenza si ottiene successivamente moltiplicando la matrice di corrente con quella di tensione. Nelle seguenti figure si vedono i risultati ottenuti dal fit di due matrici $V_m(G_i, T)$ (Figura 46) e $I_m(G_i, T)$ (Figura 47) di un modulo misurato per la durata di 2 mesi e il risultato finale per la matrice $P_m(G_i, T)$ (Figura 49). L'errore dei singoli fit è rappresentato in Figura 48.

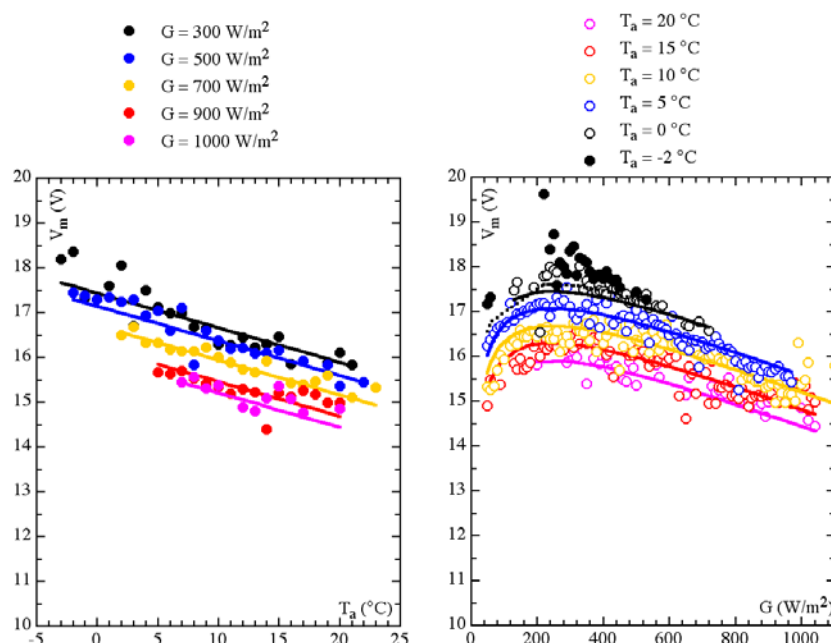
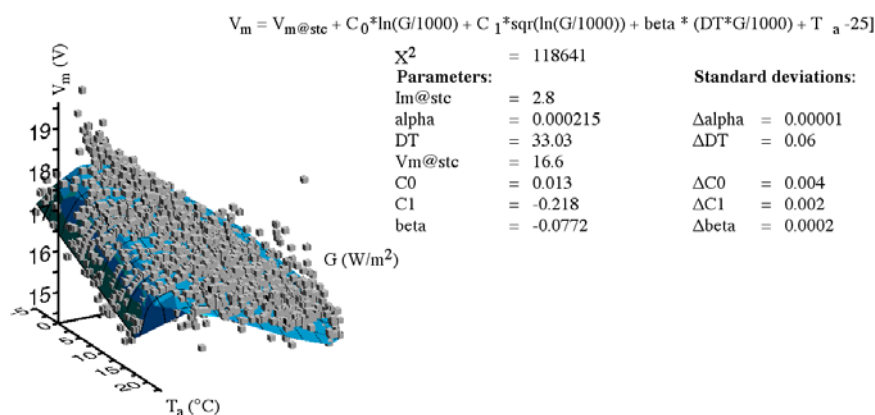


Figura 46: Risultato ottenuto dal fit di una matrice $V_m(G_i, T_a)$.



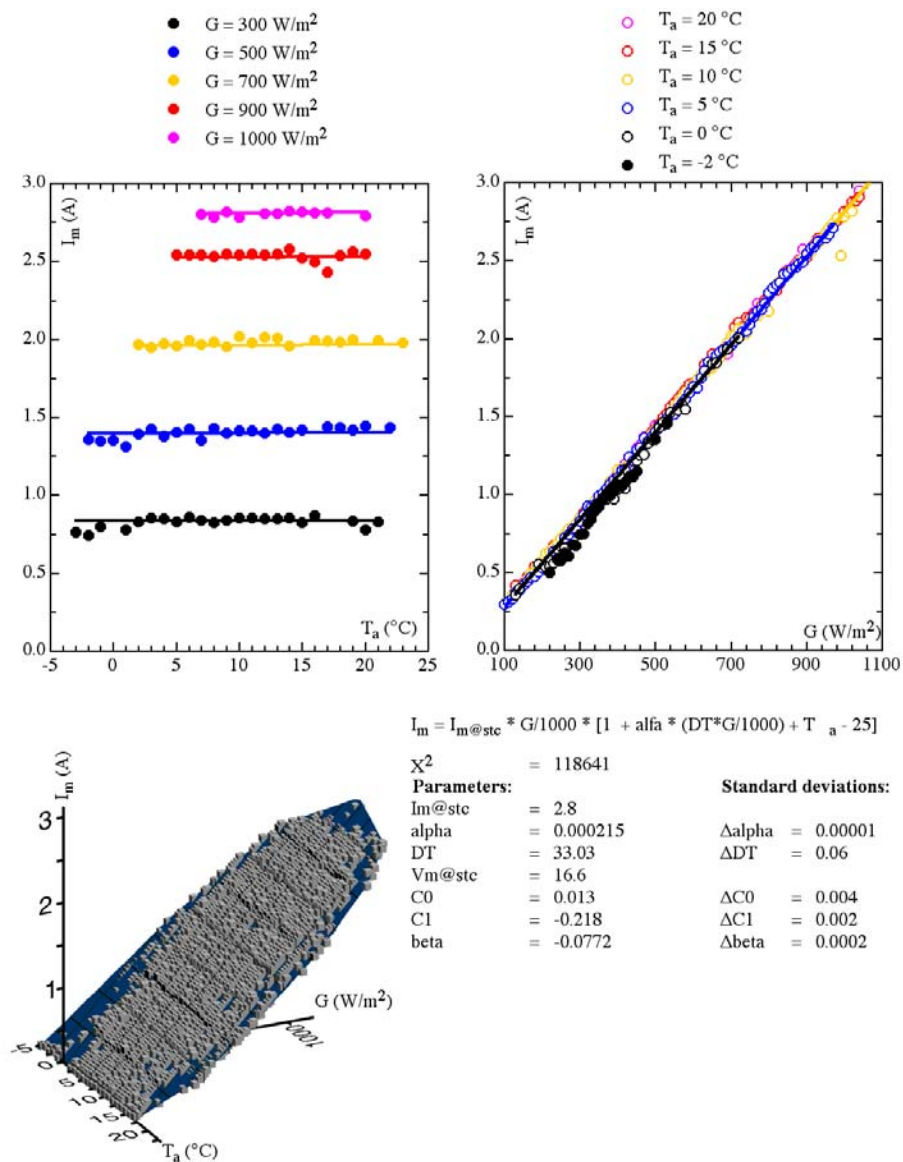


Figura 47: Risultato ottenuto dal fit di una matrice $I_m(G_i, T_a)$

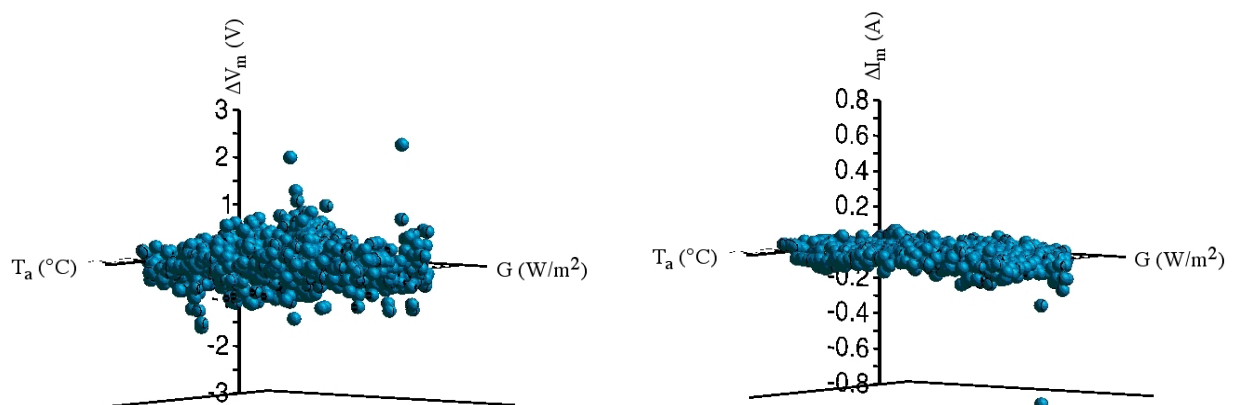


Figura 48: Precisione dei fit di Figura 46 $V_m(G_i, T_a)$ e di Figura 47 $I_m(G_i, T_a)$.

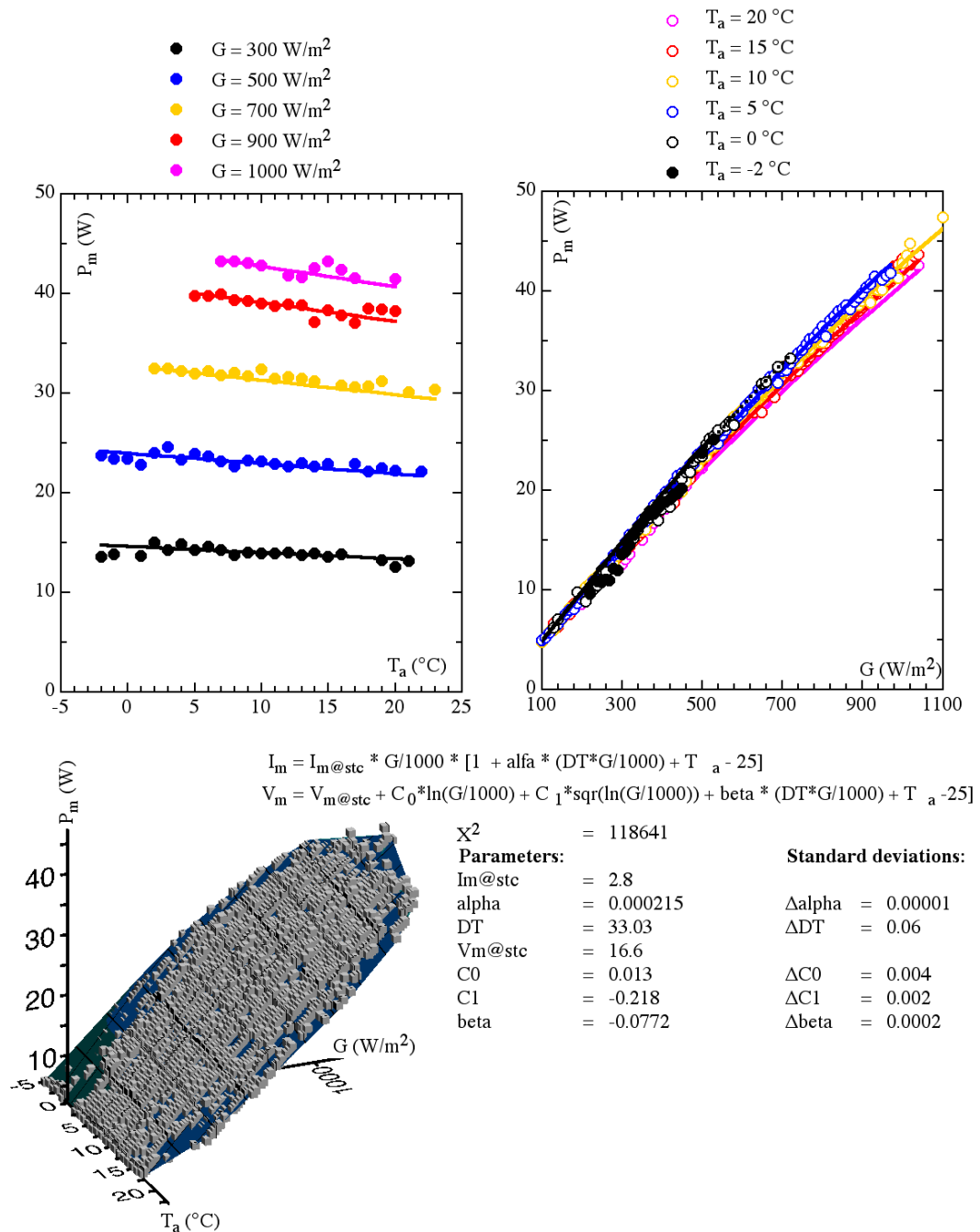


Figura 49: Risultato finale ottenuto dalla combinazione della matrice V_m e I_m

Il principale vantaggio di costruire le matrici su queste 2 equazioni è che la maggior parte delle variabili ($I_{m,sc}$, $V_{m,sc}$, α_{lm} , β_{vm} , ΔT , C_0 e C_1) hanno un significato fisico. Se già conosciute, queste variabili possono essere bloccate così da incrementare la qualità dell'interpolazione. Attualmente, delle sette variabili presenti nelle equazioni, solo due, $I_{m,sc}$ e $V_{m,sc}$, vengono misurate con il nostro simulatore solare. Questi 2 valori vengono tenuti fissi durante la procedura del fit. Gli altri valori vengono invece stimati e poi ottenuti attraverso il fit. In futuro, con l'arrivo della nuova camera termostatica per le misure dei coefficienti di temperatura (vedi capitolo 2.11), si potrà studiare la possibilità di utilizzare anche i coefficienti di temperatura α_{lm} e β_{vm} misurati indoor. Attraverso dei studi sarà poi da decidere se il valore ΔT , o espresso diversamente il valore NOST, dovrà essere misurato outdoor con un metodo velocizzato, se verrà ottenuto attraverso i fit con le equazioni (Equazione 5 e Equazione 6) o se un valore fisso tipico per un certo tipo di modulo è sufficiente per ottenere la matrice di potenza. Le variabili rimanenti C_0 e C_1 sono invece da fittare e una statistica sarà fatta per determinare in che limiti si trovano per ogni singola tecnologia.

4.10.6 La matrice meteo

Per poter calcolare la resa energetica di un modulo in un luogo specifico un progettista deve conoscere la matrice meteo di quel luogo. Essa si ottiene con l'aiuto di programmi, come per esempio Meteonorm [10], che permettono la trasformazione e l'interpolazione di dati meteo esistenti a dati giornalieri o orari. Questi programmi hanno generalmente incluso una banca dati che viene regolarmente aggiornata e che contiene dati di tutto il mondo. Esso consente inoltre di trasformare i dati d'irraggiamento sul piano orizzontale G_0 in dati su un qualsiasi piano inclinato G_i . In collaborazione del LEEE-TISO, nell'ultima versione di Meteonorm (5.0 - Edition 2003) è stata inclusa la possibilità di esportare i dati direttamente nel formato di matrice. La procedura da seguire è la seguente:

1. Scegliere il luogo desiderato all'interno della banca dati
Se il luogo non esiste scegliere un luogo equivalente o procurarsi i dati mensili d'insolazione globale sul piano orizzontale e la temperatura media mensile.
2. Scegliere l'orientamento e l'inclinazione del piano
3. Introdurre eventualmente l'orizzonte e il valore d'albedo se disponibile
4. Selezionare il formato dati “matrice TISO”
5. Generare dati orari
6. Salvare la matrice e copiarla nel file excel per il calcolo della resa energetica

L'utilizzo di Meteonorm rende ancora più semplice l'esecuzione del calcolo della resa energetica. In futuro si spera di poter integrare la procedura intera del metodo delle matrici in un software di simulazione, per esempio PVSYST, tenendo conto anche della resa energetica dei rimanenti componenti di un sistema collegato in rete.

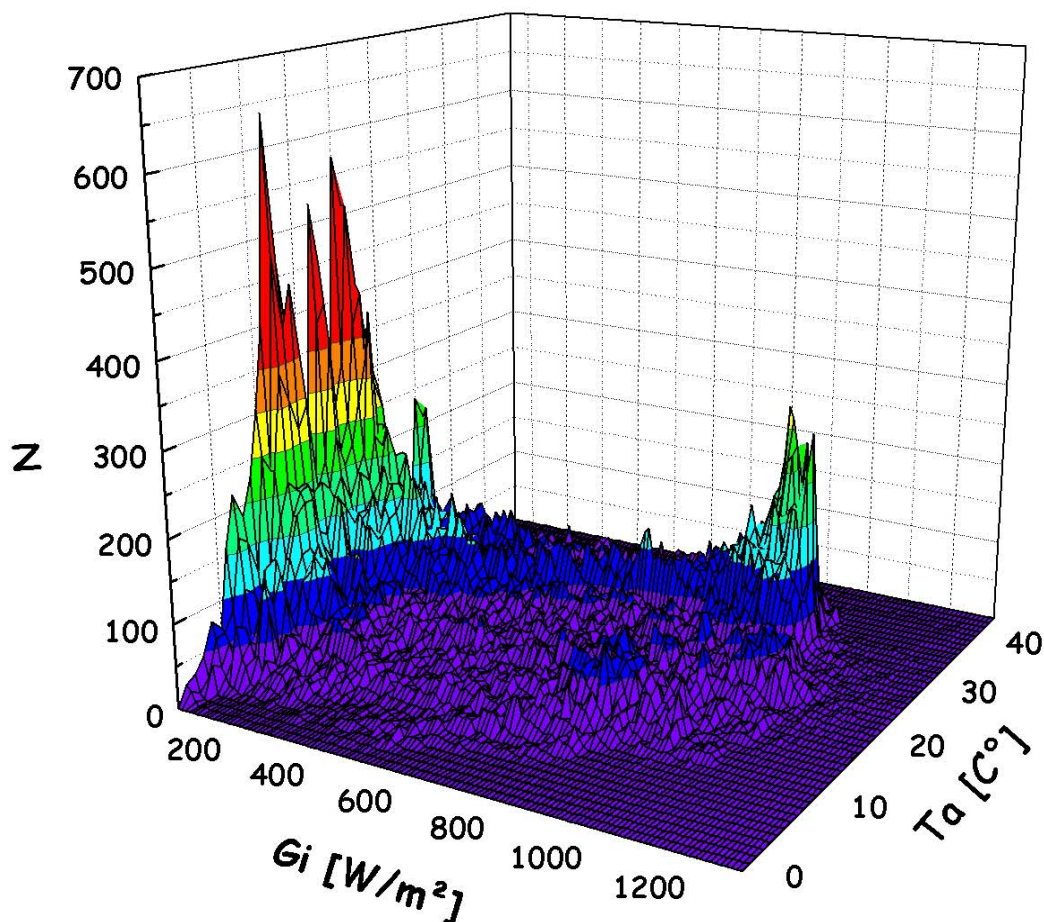


Figura 50: Matrice meteo Lugano misurata ad intervalli di 1 minuto durante il ciclo 7

La principale differenza tra una matrice realmente misurata al LEEE-TISO (Figura 50) e quella sintetizzata mediante un programma come Meteonorm è che le misure al LEEE-TISO sono effettuate ad intervalli di 1 minuto, mentre i programmi come Meteonorm possono al massimo generare valori orari. Confrontando Figura 50 e Figura 51 si può notare che la distribuzione climatica sintetizzata a partire dai dati climatici mensili, presenta una differenza importante nella distribuzione dei punti rispetto a quella che si ottiene dalle misure sulla base di 1 minuto. Il picco nettamente visibile nei dati realmente misurati sparisce nel grafico sintetizzato. Nonostante questa importante differenza, l'errore nel calcolo della resa energetica dato dall'uso di dati orari invece di dati al minuto risulta trascurabile ($< 0.5\%$).

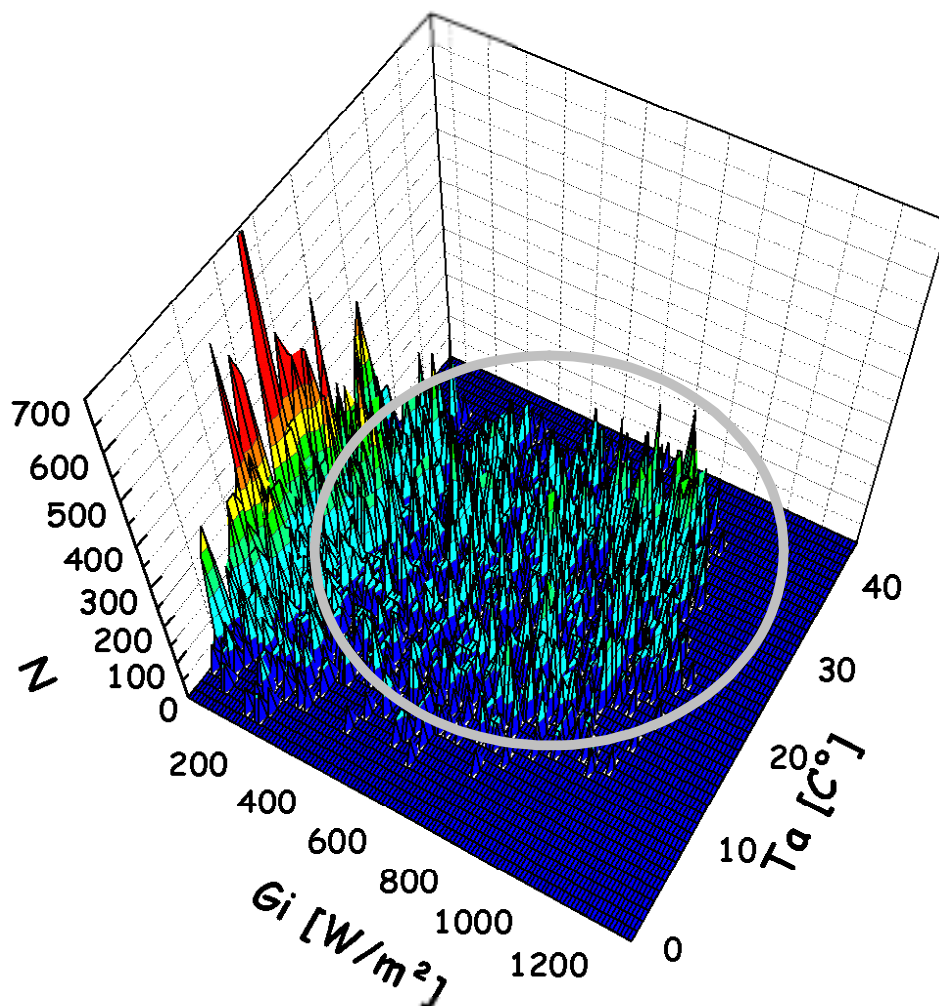


Figura 51: Distribuzione climatica sintetizzata a partire dai dati climatici mensili (Lugano)

4.10.7 Precisione del metodo delle matrici

Una verifica di quanto sia precisa una previsione di produzione d'energia annua tramite il metodo delle matrici è stata eseguita confrontando valori d'energia calcolati con valori realmente misurati durante un anno intero (Tabella 10).

I risultati ottenuti da una matrice di potenza creata da dati di un anno intero, elencati in Tabella 10, mostrano che, per un modulo montato su una struttura open-rack, la resa energetica può essere pronosticata con una precisione molto alta. Per i 17 diversi moduli testati durante il ciclo 7 (2000-2001) l'errore medio era del 1.1%. Questo errore è composto dall'errore nella determinazione della matrice di potenza ($\approx 0.4\%$) e da quello della matrice meteo ($\approx 0.7\%$).

Dal punto di vista della praticità è auspicabile diminuire la durata della misura della matrice di potenza a un minimo indispensabile. A questo scopo è stata analizzata la precisione del metodo riducendo il tempo di misura da un anno a un singolo mese. La precisione varia ovviamente da mese in mese. Nel periodo analizzato, i mesi novembre e dicembre di Lugano sono risultati come non adatti a questo tipo di misura a causa dei valori d'irraggiamento molto bassi. Da Tabella 11 si vede che per i mesi rimanenti ed in particolare per tutte le tecnologie standard (sc-Si, mc-Si) e per i moduli CIGS l'errore, in confronto alla misura di un

anno, è aumentato di poco (errore medio $\approx 2\%$). Per le altre tecnologie (a-Si) l'errore è risultato molto più alto (4-6%). Ciò è dato dal comportamento particolare del silicio amorfo dovuto agli effetti di degrado, nonché di recupero, del rendimento (STC) a dipendenza della storia di esposizione esterna.

Module name & technology		E(reale)	E(calc)	$\Delta E(\text{reale})-E(\text{calc})$
		anno	METEONORM	
		[kWh]	[kWh]	[kWh]
SW50T	sc-Si	44.48	44.39	-0.21%
Sunslates	sc-Si	58.61	58.29	-0.55%
SM55	sc-Si	61.26	61.48	0.35%
M-S36-53	sc-Si	57.29	56.99	-0.53%
M500A	sc-Si	58.94	58.30	-1.09%
BP275F	sc-Si	78.73	79.61	1.12%
ASI16-2300	sc-Si	42.61	41.85	-1.76%
RSM50	mc-Si	57.56	57.17	-0.69%
PW1000	mc-Si	105.38	103.92	-1.39%
MSX83	mc-Si	82.91	84.43	1.83%
KC60	mc-Si	69.41	68.96	-0.64%
GPV75P	mc-Si	76.61	77.66	1.37%
ASE-100	mc-Si	117.94	116.90	-0.88%
APX90	mc-Si	80.00	78.27	-2.16%
US64	a-Si	83.54	83.94	0.48%
DS40	a-Si	49.51	48.52	-2.00%
ST40	CIS	46.48	45.80	-1.47%
Errore massimo				2.16%
Errore medio				1.09%

Tabella 10: Verifica della precisione di calcolo della resa energetica mediante il metodo delle matrici basandosi su dati di un anno.

Module name & technology		Ereal	Emeas		$\Delta E_{\text{real-Emeas}}$	
		anno	anno	luglio	anno	luglio
		[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
SM55	sc-Si	61.26	60.98	61.64	-0.46%	0.63%
M-S36-53	sc-Si	57.29	57.16	57.38	-0.23%	0.16%
M500A	sc-Si	58.94	58.71	59.53	-0.39%	1.00%
BP275F	sc-Si	78.73	78.48	78.60	-0.32%	-0.16%
ASI16-2300	sc-Si	42.61	42.42	41.97	-0.44%	-1.50%
RSM50	mc-Si	57.56	57.33	57.86	-0.41%	0.53%
PW1000	mc-Si	105.38	104.92	103.84	-0.44%	-1.47%
MSX83	mc-Si	82.91	82.90	83.66	-0.01%	0.90%
KC60	mc-Si	69.41	68.98	69.71	-0.62%	0.43%
GPV75P	mc-Si	76.61	76.67	76.96	0.08%	0.45%
ASE-100	mc-Si	117.94	117.59	119.31	-0.29%	1.16%
APX90	mc-Si	80.00	79.94	81.58	-0.07%	1.97%
US64	a-Si	83.54	84.39	88.55	1.02%	6.00%
DS40	a-Si	49.51	49.41	51.77	-0.20%	4.56%
ST40	CIS	46.48	46.25	46.49	-0.49%	0.02%
Max Error *					1.02%	1.97%
Average Error *					0.37%	0.80%

Tabella 11: Verifica della precisione di calcolo della resa energetica mediante il metodo delle matrici basandosi su dati di un anno e di un singolo mese.

La precisione di calcolo della resa energetica dipende inoltre dal dimensionamento della matrice. Una matrice di potenza $P(G_i, T_a)$ è definita dal range delle coordinate G_i e T_a (valori minimi e massimi) e dagli intervalli (maglia della griglia: ΔG_i , ΔT_a). Possiamo per esempio definire una matrice di potenza nei limiti di $50 < G_i < 1000 \text{ W/m}^2$ e di $10 < T_a < 40^\circ\text{C}$, con per esempio una maglia di $100[\text{W/m}^2] \times 10[^\circ\text{C}]$ oppure di $10[\text{W/m}^2] \times 1[^\circ\text{C}]$ (Figura 52).

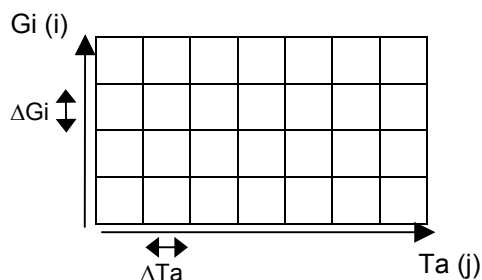


Figura 52: Definizione delle dimensioni di una matrice di potenza.

Per studiare l'effetto della maglia della griglia sul calcolo della resa energetica sono state considerate tre matrici di potenza diverse (Figura 53) con un range di $50 < G_i < 1300 \text{ [W/m}^2\text{]}$ e di $-5 < T_a < 40 \text{ [}^\circ\text{C]}$ e rispettivamente una spaziatura della maglia della griglia di:

- A) $10 \text{ [W/m}^2\text{]} \times 1 \text{ [}^\circ\text{C]}$; (abbreviato in 10x1)
- B) $50 \text{ [W/m}^2\text{]} \times 2 \text{ [}^\circ\text{C]}$; (abbreviato in 50x2)
- C) $100 \text{ [W/m}^2\text{]} \times 5 \text{ [}^\circ\text{C]}$; (abbreviato in 100x5)

Le tre varianti di spaziature sono state utilizzate per il calcolo della resa energetica annuale di 9 tipi di moduli. Per la parte meteo è stata usata la matrice meteo misurata durante il ciclo7. Nella Tabella 12 sono riportati i risultati principali.

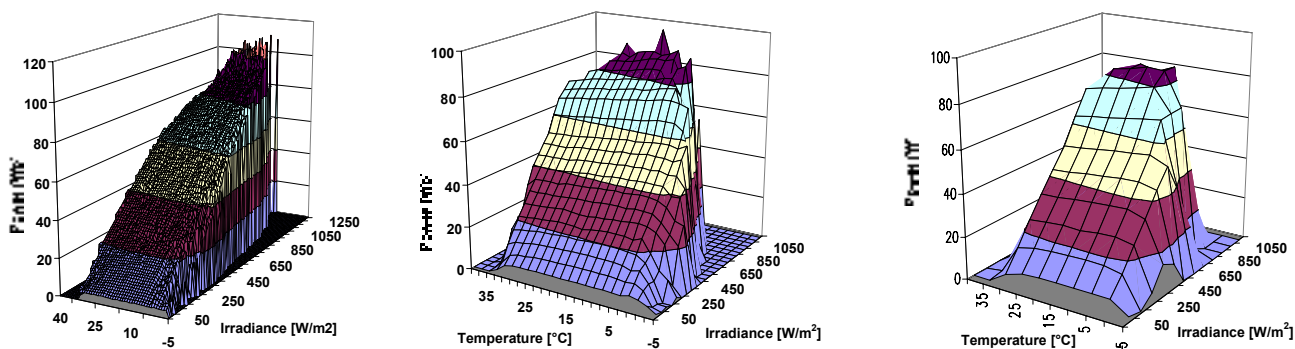


Figura 53: Esempio di matrici di potenza con intervalli di 10x1, 50x2 e 100x5.

Tipo Modulo	Pn [W]	10x1 [kWh]	Yield [Wh/Wp]	50x2 errore [%]	100x5 errore [%]
DS40 a-Si	40	43.42	1.09	-0.40%	6.79%
US64 a-Si	64	75.23	1.18	-0.47%	6.36%
ST40 CIS	38	43.26	1.14	-0.40%	6.81%
SM55 sc-Si	55	55.95	1.02	-0.40%	6.79%
ASE100 sc-Si	100	107.5	1.08	-0.44%	6.72%
BP275F sc-Si	75	71.44	0.95	-0.36%	6.85%
APX90 mc-Si	90	72.9	0.81	-0.45%	6.69%
KC60 mc-Si	60	62.00	1.03	-0.44%	6.73%
RSM50 mc-Si	49	50.01	1.02	-0.43%	6.72%

Tabella 12: Errore dato dal calcolo della produzione d'energia con diverse spaziature della maglia della matrice di potenza.

Si nota che utilizzando la grandezza della maglia di 100x5 si introduce un errore superiore al 6% per tutte le tecnologie rispetto alla maglia 10x1. Per contro, utilizzando una grandezza della maglia di 50x2 si ottengono, nel nostro caso, degli errori non superiori allo 0.5%. In un clima come il nostro la maggior parte dell'energia annuale di un modulo è prodotta in una zona ristretta della matrice di potenza (tra gli 800 e i 1000W/m²), di conseguenza una larghezza della griglia di 50W/m² risulta essere il limite superiore.

4.10.8 Il metodo delle matrici applicato a diverse strutture di montaggio

I studi si sono fino ad ora concentrati su moduli montati in strutture open-rack. Oltre che dall'irraggiamento la resa energetica dipende però anche dalla temperatura del modulo e di conseguenza dalla configurazione della struttura portante. Il passo successivo è perciò di trovare un modo per pronosticare la resa energetica per diversi tipi di montaggio. Siccome sarebbe praticamente impossibile tener conto di tutti i possibili tipi di strutture, si prevede in futuro di valutare solo un numero limitato di possibilità che rappresentino le strutture più frequenti nell'installazioni di oggi (open-rack, isolato, isolato + ventilazione, ecc.).

Nel caso degli studi presentati nei capitoli precedenti si utilizza sempre la matrice di potenza $P(G_i, T_a)$ in dipendenza della temperatura ambiente per calcolare l'energia prodotta, invece di riferirsi alla matrice in dipendenza della temperatura del modulo $P(G_i, T_{bom})$. Il vantaggio è che la matrice di potenza $P(G_i, T_a)$ può essere direttamente combinata con la matrice meteo $N(G_i, T_a)$ senza dover trasformare la matrice $P(G_i, T_{bom})$ in $P(G_i, T_a)$. Lo svantaggio è che la matrice $P(G_i, T_a)$ dipende dal tipo di struttura di montaggio mentre la matrice $P(G_i, T_{bom})$ rimane sempre la stessa. Nel caso che si voglia determinare la matrice $P(G_i, T_a)$ per diverse strutture senza doverla misurare per ogni singolo caso o se si conosce solo la matrice $P(G_i, T_{bom})$, come nel caso di un misura indoor, una trasformazione dei dati da $P(G_i, T_{bom})$ in $P(G_i, T_a)$ è perciò necessaria.

La procedura utilizzata al LEEE-TISO per la trasformazione di una matrice da $P(G_i, T_{bom})$ in $P(G_i, T_a)$ è basato sulla seguente equazione che equivale alla definizione del valore NOCT (nominal operating cell temperature) ad eccezione che il valore NOCT è sostituito dal valore NOST (nominal operating specific temperature).

Equazione 7 $T_{bom \text{ o cell}} = (NOST - 20^\circ) \cdot G_i / 800 + T_a$

Si è osservato che utilizzando il valore NOCT definito dagli standard e spesso anche dichiarato dai fabbricanti con un valore di ca. 42°C, la traslazione non è eseguibile in modo corretto. È stato perciò necessario definire un nuovo valore leggermente diverso dal valore NOCT. La principale differenza consiste nel fatto che nel caso della NOCT il modulo non si trova in condizioni reali di funzionamento, cioè al suo punto di massima potenza per un impianto collegato in rete, e che il valore si riferisce solamente a strutture open-rack di un certo tipo. La temperatura NOST di un modulo è invece legata ad un montaggio e funzionamento specifico. L'equilibrio termico che s'instaura per esempio in un modulo al punto di massima di potenza rispetto ad un modulo scollegato, porta ad una diminuzione della temperatura come conseguenza del prelevamento dell'energia elettrica.

	NOST [°C]	$P(G_i, T_a) \rightarrow E$ [kWh]	$P(G_i, T_{bom}) \rightarrow E$ [kWh]	Errore [%]
PW1000	40.49	105.38	105.35	0.03
APX90	42.28	81.48	81.44	0.05
ASH16	38.42	40.6	40.57	0.07
MSX83	42.2	85.74	85.72	0.02
GPV75P	35.83	76.61	77.17	-0.73
MS36-53	39.57	57.29	57.42	-0.23
RSM50	40.18	57.56	57.59	-0.05
DS49	38.37	49.51	49.28	0.46
US64	39.1	65.94	65.32	0.94
SUNSLATE	38.11	60.84	61.03	-0.31
SW50T	42.72	44.48	44.32	0.36
ASE100	40.46	120.28	119.95	0.27
KC60	39.07	69.41	69.1	0.45
M500A	41.68	58.94	58.87	0.12
SM55	40.27	61.26	60.98	0.46
ST40	42.35	49.31	49.11	0.41
BP275F	37.76	78.73	79.62	-1.13
minimo	35.83			0.02
massimo	42.72			1.13
media	39.93			0.36

Tabella 13: Valori NOST, energie calcolate ed errore di trasposizione di tutti i moduli del ciclo 7.

Applicando l'equazione Equazione 7 alle matrici $P(G_i, T_{bom})$ misurate nel ciclo 7 si è visto che l'errore nel calcolo della resa energetica è mediamente inferiore allo 0.4% con un massimo del circa 1.1% (vedi Tabella 13). L'errore dipende soprattutto dalla precisione nella determinazione del valore NOST. Nel nostro caso una variazione di NOST di $\pm 5^\circ\text{C}$ porta ad una differenza nel pronostico della resa energetica di circa $\pm 1.5\%$.

Fino ad ora al LEEE-TISO il valore NOST per ogni modulo è stato estratto dalle misure della matrice stessa. In Figura 54 è mostrato un esempio ($T_{bom} - T_a$ verso G_i) di un modulo ASE100. Dalla interpolazione lineare viene calcolato il valore NOST del modulo.

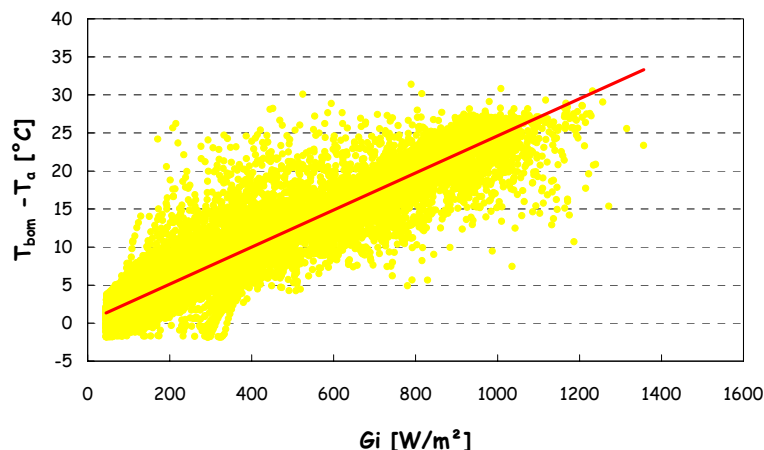


Figura 54: Rappresentazione di $T_{bom} - T_a$ in funzione di G_i e interpolazione lineare per un modulo ASE100 misurato per un anno intero.

In genere si osserva che il valore NOST varia con le condizioni climatiche come per esempio la velocità e la direzione del vento e di conseguenza con il mese in cui la misura viene eseguita.

Ulteriori studi saranno da effettuare per definire una procedura simile agli standard presenti per il NOCT che renda le misure riproducibili e abbastanza precise per la traslazione $P(G_i, T_{bom}) \rightarrow P(G_i, T_a)$. L'obiettivo finale è di avere per ogni modulo dei valori $NOST \pm x\%$ per diverse strutture di montaggio, per esempio: $NOST_{open-rack}$, $NOST_{isolato}$, $NOST_{isolato + ventilazione}$, ecc. che permetterebbero di pronosticare l'energia prodotta da un modulo a dipendenza del tipo di montaggio.

4.10.9 Confronto tra diversi laboratori

L'utilizzo del metodo delle matrici come metodo per il pronostico della resa energetica richiede la verifica della riproducibilità della misura della matrice di potenza. La matrice di potenza ottenuta da una misura non deve solo essere indipendente dal luogo e dal periodo in cui è stata acquisita, ma deve essere inoltre riproducibile da diversi laboratori con differenti sistemi di misura e con diversi metodi d'elaborazione dei dati (vedi capitolo 4.4).

A questo scopo sono in corso diverse collaborazioni con altri laboratori:

- ricerca specifica con il laboratorio ESTI del centro comune di ricerca (JRC) di Ispra,
- progetto BfE con la ditta ENECOLO e i laboratori del JRC e del PSI.
- progetto europeo (PV-Catapult), iniziato nel 2004, in cui partecipano i maggiori laboratori europei attivi nel campo delle prove sui moduli fotovoltaici.

In questo rapporto verranno principalmente presentati i risultati ottenuti dalla collaborazione con Ispra. I risultati del progetto coordinato dal ENECOLO e parzialmente finanziato dal BFE verranno pubblicate in un rapporto BfE separato.

Lo studio con il JRC Ispra si è concentrato sulla misura della matrice di potenza di un singolo modulo a silicio cristallino, tipo ASE100. Le misure eseguite sullo stand del LEEE-TISO sono state confrontate con quelle del JRC Ispra, sia con misure indoor con un simulatore solare che misure outdoor su uno stand dedicato all'energy rating. Le misure outdoor di Ispra sono attualmente ancora in corso. Una descrizione più dettagliata dei loro sistemi di misura si trovano nell'articolo pubblicato alla 3rd Word PV Conference, Osaka [11].

La prima tabella (Tabella 14) mostra i risultati ottenuti del confronto delle due misure outdoor. A causa della durata ridotta delle misure effettuate ad Ispra (10 settimane) non è stato possibile confrontare tutti i punti della matrice di potenza. I risultati hanno comunque mostrato che la differenza media tra le due misure è del 2.1%. Per irraggiamenti al di sotto dei 100 W/m^2 la differenza raggiunge quasi il 10%. Dai risultati del calcolo della resa energetica (Tabella 16) si vede che questa differenza ha un'influenza comunque minima

sul calcolo della resa energetica annuale. Questa discrepanza a bassi irraggiamenti può in parte dipendere dall'influenza maggiore a questi livelli del angolo d'incidenza (AOI), di effetti spettrali (AM) e della percentuale di luce diffusa (G_{diff}), ma anche da problemi di misura come per esempio un malfunzionamento nei regimi bassi del MPPT (sistema di inseguimento del punto di massima potenza) o di un errore nelle misure d'irraggiamento al di sotto dei 150 W/m^2 ma anche da una imprecisione maggiore a bassi irraggiamenti del metodo di estrapolazione della matrice di potenza. Delle verifiche dovranno essere fatte per diminuire queste differenze.

G17	25	30	35	40	45	50	55	60
100	9.42							
200	1.83	0.94						
300	-1.86	-0.40						
400	-2.86	-1.89	-2.43					
500	-3.72	-2.71	-1.87	-2.22				
600	-2.86	-3.54	-2.31	-2.25	3.79			
700	-3.85	-3.50	-2.60	-2.07	-2.35			
800	3.55	-2.32	-2.41	-1.92	-1.12			
900		0.62	-1.74	-1.51	-0.63	-0.67		
1000		-0.23	-0.35	0.40	1.23	0.80	-1.91	

Tabella 14: Differenza in percento [%] tra la matrici di potenza $P(G_i, T_{bom})$ [$\text{W/m}^2, ^\circ\text{C}$] misurata outdoor dal LEEE-TISO e il JRC Ispra. Un valore positivo indica un valore di potenza più alto da parte del LEEE-TISO.

Il secondo confronto riguarda la misure indoor di Ispra con quelle outdoor di tutti e due i laboratori. Nella seguente Figura 55 è rappresentata la matrice misurata indoor e fittata con le equazioni: Equazione 5 e Equazione 6.

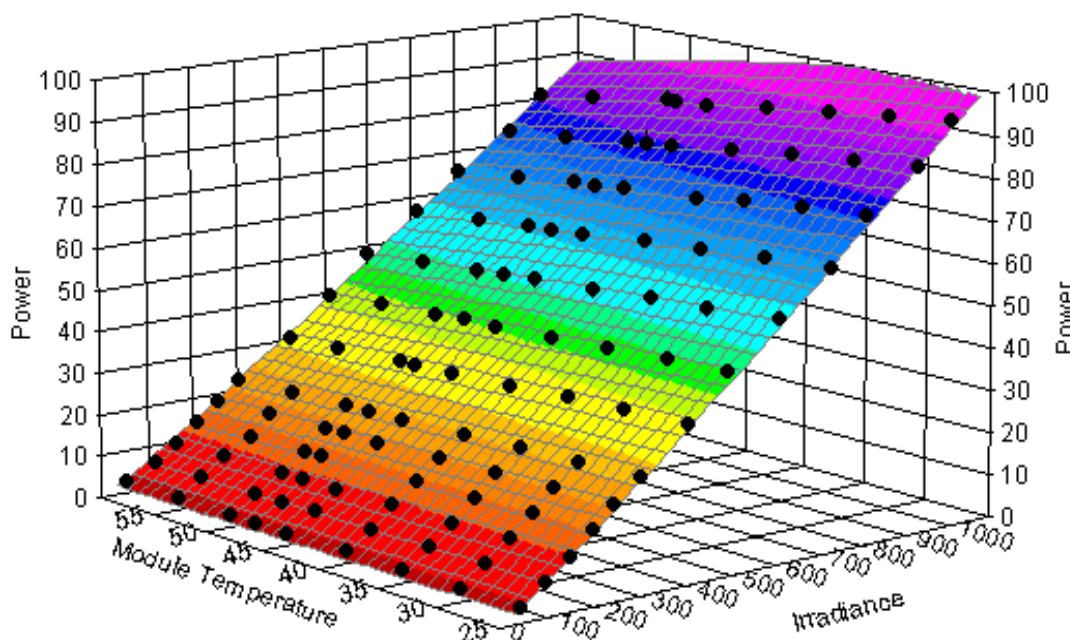


Figura 55: Matrice di potenza misurata su un simulatore solare pulsato e fittata con Equazione 5 e Equazione 6.

La Tabella 15 mostra i risultati ottenuti. La differenza media tra indoor e outdoor è del 2.1% per il LEEE-TISO e del 1.3% per il JRC Ispra. La differenza leggermente più alta da parte del LEEE-TISO è data

dall'estrapolazione dei valori misurati a tutti i valori climatici possibili, mentre Ispra ha considerato esclusivamente i valori realmente misurati, ottenendo di conseguenza una matrice incompleta.

G_iT	30°C	40°C	50°C	60°C
200 W/m²	3.1/2.14	2.77/...	2.91/...	3.81/...
400W/m²	-0.56/1.36	-0.58/...	0.13/...	0.82/...
600 W/m²	-2.51/1.07	-2.34/-0.09	-1.61/...	-1.03/...
800 W/m²	-2.43/-0.12	-1.90/0.01	-0.77/...	-0.39/...
1000 W/m²	-1.31/-1.08	-0.61/-1.00	-0.07/-0.73	1.15/...

Tabella 15: Differenza in percento [%] tra le matrici di potenza misurate indoor e outdoor dal TISO/Ispra.

Al fine di poter calcolare la resa energetica per tutti i 3 casi (Ispra indoor, Ispra outdoor e LEEE-TISO outdoor) le matrici $P(G_i, T_{bom})$ misurate sono state fittate con le equazioni e successivamente trasformate in matrici $P(G_i, T_a)$ o in alternativa se disponibili sono state utilizzate direttamente le matrici $P(G_i, T_a)$ misurate. Un confronto è stato eseguito tra l'energia realmente prodotta e l'energie calcolata con le diverse matrici e con la matrice meteo misurata simultaneamente all'energia realmente prodotta. L'energia è stata misurata al LEEE-TISO con un contatore d'energia.

Resa Energetica calcolata & misurata		Energia kWh	Differenza %
Energia misurata con	contatore d'energia (LEEE-TISO)	125.71	---
Energia calcolata con	matrice di potenza $P(G_i, T_a)$ misurata outdoor al LEEE-TISO	123.14	-2.0
	matrice di potenza $P(G_i, T_{bom})$ misurata outdoor al LEEE-TISO	122.25	-2.8
	matrice di potenza $P(G_i, T_{bom})$ misurata outdoor al JRC-ISPRA	121.68	-3.2
	matrice di potenza $P(G_i, T_{bom})$ misurata indoor al JRC-ISPRA	121.13	-3.6

Tabella 16: Calcoli della resa energetica annuale [kWh] usando la matrice meteo misurata al LEEE-TISO e le diverse matrici di potenza e differenze [%] tra quelle calcolate e quella realmente misurata.

Malgrado la differenza delle condizioni climatiche e dei sistemi di misura utilizzati l'errore nel calcolo della resa energetica è risultato al di sotto del 4%. Questo è un risultato accettabile considerando che si è tenuto conto di solo due parametri esterni, l'irraggiamento globale e la temperatura ambiente. Questi parametri hanno il vantaggio di essere facilmente reperibili da una qualsiasi stazione meteorologica del luogo o da una banca dati. Altri parametri come la velocità e direzione del vento, distribuzioni spettrali della luce ed angolo d'incidenza potrebbero essere inclusi, ma porterebbero a rendere il metodo più complicato per un progettista.

Tutti i confronti fino ad ora eseguiti tra diversi laboratori hanno dimostrato che la limitazione alla temperatura ambiente e l'irraggiamento porta ad una incertezza complessiva nel calcolo della resa energetica di moduli standard al silicio cristallino nel ordine del +/- 5%. Si è dimostrato che con una combinazione di metodi di misura standard già esistenti un pronostico della resa energetica è possibile senza dover appositamente creare una procedure nuova che necessiterebbero di tempi lunghi per la loro implementazione.

4.10.10 Pronostico della resa energetica di moduli a film sottile

Come dimostrato nei precedenti capitoli, per i moduli al silicio mono- e policristallino un pronostico della resa energetica è eseguibile con una buona precisione. Questo sembra essere anche valido per i moduli CIS. L'aspetto più critico sembra ancora quello del pronostico della resa energetica di moduli al silicio amorfo, ed in generale, di una gran parte dei moduli a film sottile. Questi tipi di moduli presentano un comportamento particolare alla variazione delle condizioni climatiche. Presentano effetti di degrado nonché di recupero del rendimento. In aggiunta il pronostico si complica a causa della disomogeneità nella produzione dei moduli. Le differenze di potenza tra un modulo e l'altro dello stesso tipo sono ancora relativamente alte in confronto alle tecnologie del silicio cristallino. Di conseguenza può variare anche di molto l'energia prodotta da un modulo o l'altro anche se dichiarato con la stessa potenza nominale.

Come già detto nel capitolo precedente, la precisione della resa energetica calcolata per i moduli c-Si cambia di poco se invece di una matrice ottenuta da un anno di dati si usa quella ottenuta in un mese. Nel caso di moduli amorfi l'errore può invece raggiungere il 6%. Il problema sta nella riproducibilità delle misure di questo tipo di moduli. In dipendenza delle condizioni climatiche presenti al momento delle misure e della storia del modulo la matrice di potenza può variare di molto. La matrice misurata in un determinato anno può essere utilizzata per il calcolo della produzione d'energia solo per quel anno, come si vede dai buoni risultati in Tabella 11, ma non può essere utilizzata per un pronostico di un altro anno. Senza tener conto del degrado, degli effetti di memoria e del comportamento particolare alla variazione delle condizioni climatiche non è possibile pronosticare la resa energetica di un modulo amorfo.

Come si vede in Figura 56 la matrice di potenza, ottenuta da un anno di dati, di un modulo amorfo ha un andamento diverso da quello osservato per il silicio cristallino (Figura 45). Il coefficiente di temperatura del modulo amorfo risulta praticamente positivo invece che negativo, come previsto dalla teoria e da misure fatte con un simulatore solare.

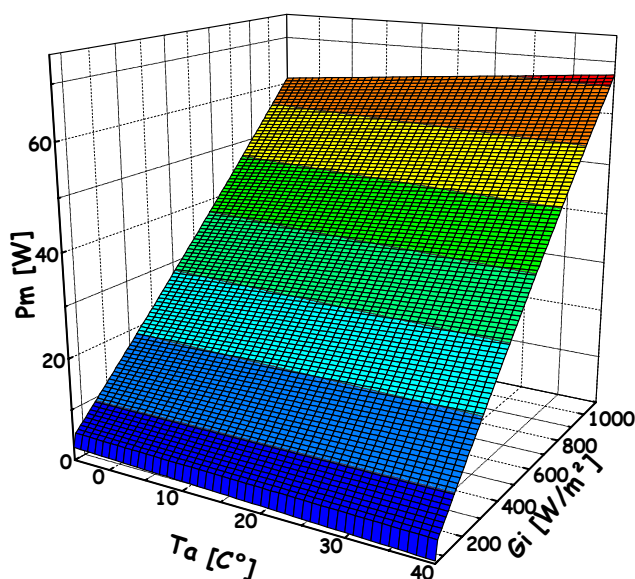


Figura 56: Tipica matrice di potenza di un modulo a silicio amorfo ottenuta con dati su un periodo di un anno.

Una spiegazione per questo coefficiente di temperatura “positivo” potrebbe essere dato proprio dal fatto della variazione di potenza @ STC del modulo esposto outdoor (vedi esempio Figura 57). Un studio preliminare per verificare questa teoria è stato fatto assumendo per l'amorfo una matrice di potenza con un coefficiente di temperatura uguale a quello misurato indoor, cioè negativo, ma di quasi tre volte più piccolo di quello di un modulo cristallino. Questa matrice è stata variata in proporzione alla potenza @ STC che il modulo ha nei diversi periodi dell'anno. Cioè la matrice del modulo normalizzata a 1 W è stata moltiplicata con il valore di potenza misurata indoor per ogni singolo periodo dell'anno. Lo studio ha confermato che la combinazione delle diverse matrici di un anno, cioè la media annuale, può risultare in una matrice con un coefficiente di temperatura effettivo positivo. In Figura 58 è mostrata la matrice di potenza normalizzata a 1W usata per questo test.

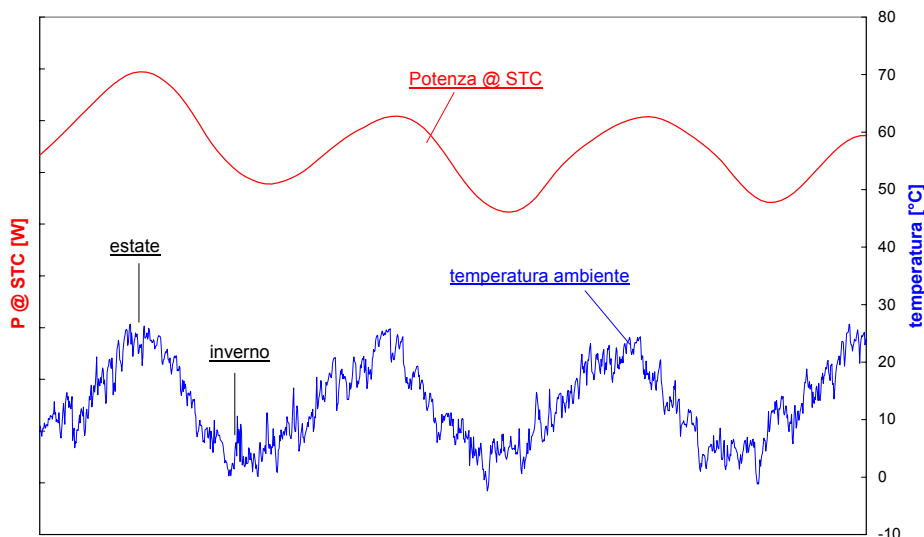


Figura 57: Simulazione della variazione stagionale di $P @ STC$ di un modulo amorfo a Lugano.

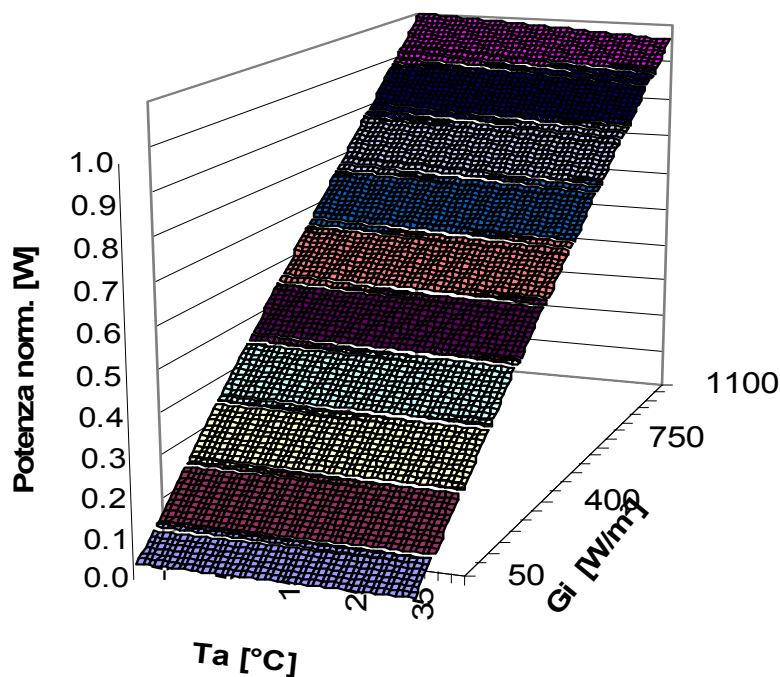


Figura 58: Simulazione di una matrice di potenza di un modulo amorfo normalizzato a 1W.

Come dimostrato da diverse pubblicazioni [12] la potenza @ STC di un modulo amorfo dipende molto dal luogo in cui esso viene installato. Condizioni climatiche diverse possono portare a delle curve stagionali differenti. Figura 57 rappresenta la potenza di un modulo amorfo montato a 45° , orientato verso sud a Lugano. Con delle condizioni climatiche diverse oppure un altro tipo di materiale amorfo, la curva d'andamento della potenza @ STC può variare. Il massimo di potenza non deve per forza coincidere con il massimo di temperatura durante l'estate. Un andamento stagionale diverso da quello di Figura 57 può di conseguenza portare ad una matrice annuale con un coefficiente di temperatura negativo. I principali parametri meteo ad influenzare le differenze da un luogo all'altro sono la temperatura e l'irraggiamento ma anche la composizione spettrale della luce. Un sforzo maggiore sarà necessario per poter simulare questo comportamento e integrarlo nel metodo di pronostico della resa energetica.

Come visibile in Figura 59, malgrado ai problemi di pronostico della resa energetica, questo genere di tecnologie ha il vantaggio di una resa energetica per Watt picco (kWh/W) leggermente maggiore rispetto ai suoi concorrenti al silicio cristallino. Figura 59 rappresenta l'energia prodotta in kWh in un anno da diversi moduli (2 moduli a-Si, 1 CIS e 13 c-Si) in dipendenza della loro potenza reale P_{15} misurata dopo 15 mesi di

funzionamento. Come previsto, il modulo CIS sembra avere una resa simile a quella del modulo al silicio cristallino, ma la verifica su un maggior numero di moduli CIS di diversi produttori sarebbe necessaria per poter fare delle conclusioni. La produzione maggiore da parte dei moduli amorfi è dovuto in parte ai coefficienti di temperatura minori e ai possibili effetti di recupero causate dal riscaldamento dei moduli. Questo miglior funzionamento a temperature più elevate gioca in favore dell'utilizzo dei moduli al silicio amorfo in strutture integrate nei tetti e nelle facciate dove una buona ventilazione è difficile da realizzare. In condizioni favorevoli l'isolamento di un modulo può addirittura portare ad una produzione d'energia maggiore in confronto allo stesso modulo senza isolamento sul retro (vedi capitolo 5.4).

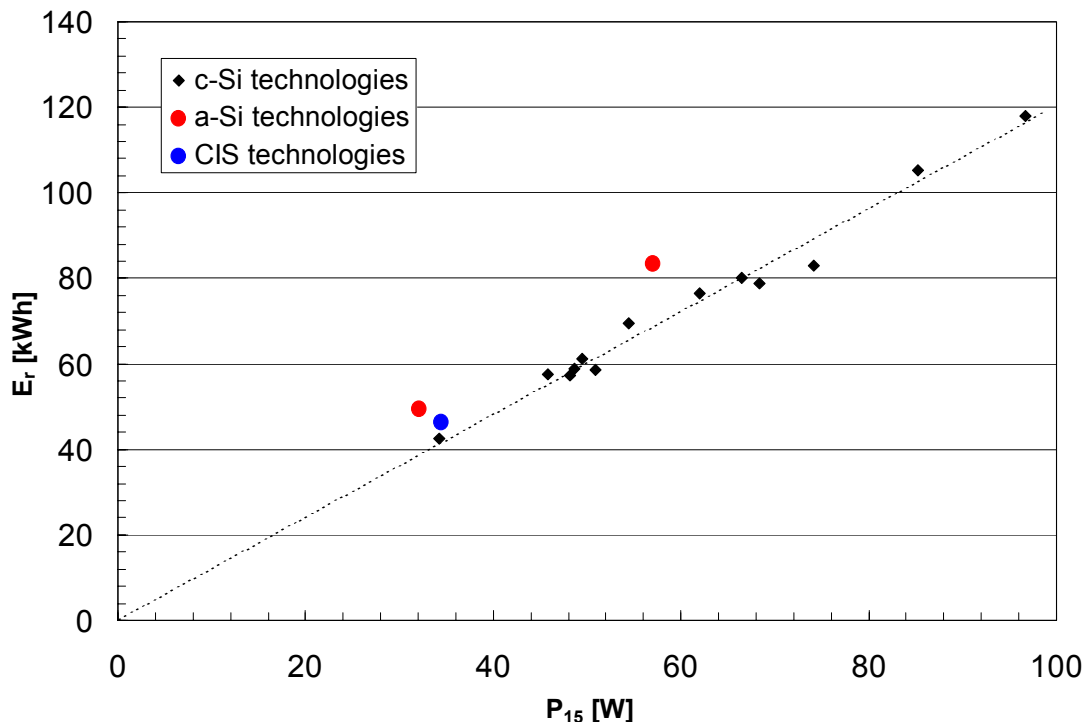


Figura 59: Energia prodotta [kWh] in un anno dai moduli del ciclo7 in dipendenza della loro potenza reale P_{15} misurata dopo 15 mesi di operazione.

4.10.11 Studio statistico sulla produzione d'energia di moduli a silicio cristallino

Uno dei scopi del stand di prova del LEEE-TISO è quello di confrontare e quantificare la produzione di energia delle principali tecnologie sul mercato. I moduli al silicio cristallino sono tuttora la tecnologia dominante e la prima domanda che si pone è di quanto è realmente la differenza di produzione in kWh per Watt reale dei diversi moduli. A causa del gran numero di moduli al silicio cristallino testati dal nostro laboratorio è stato possibile eseguire un studio statistico preliminare che ha consistito nel rapportare la produzione d'energia di tutti i moduli del ciclo 7 e 8 alla loro potenza nominale e a quella reale stabilizzata (Figura 60).

Si è così potuto fare diverse osservazioni. Da Figura 60 si vede chiaramente che il silicio cristallino, indipendentemente se sia del tipo mono o polycrystallino, sembra comportarsi in modo lineare. Nel primo caso, mettendo in relazione l'energia prodotta di ogni singolo modulo con la relativa potenza nominale, si osserva che la produzione per Watt varia del $\pm 20\%$. Questa differenza è consistente, ma dipende principalmente dalla discrepanza tra la potenza dichiarata dai fabbricanti e quella reale (vedi capitolo 4.6).

Escludendo questo "errore", cioè prendendo la potenza reale stabilizzata di un modulo P_{stab} invece della potenza nominale P_n , la variazione di produzione si riduce già a $\pm 5\%$. Questo combacia con osservazioni fatte da altri laboratori [13,14]. Dal punto di vista economico una differenza del $\pm 5\%$ nella resa energetica è ancora determinante per la scelta del tipo di modulo. La difficoltà sta però nel dare all'utente finale una tabella che rappresenti la reale energia mediamente prodotta da un tipo di modulo.

I punti rappresentati in Figura 60 equivalgono a un singolo modulo e non per forza alla media dei moduli prodotti. Per avere la media sarebbe necessario conoscere la curva di distribuzione della potenza di ogni tipo di modulo. Anche se generalmente conosciuta dal fabbricante questa curva di distribuzione non viene resa pubblica. Il produttore dichiara una tolleranza della sua potenza nominale, ma in genere non coincide con la vera curva di distribuzione. Fino a quando la qualità delle dichiarazioni fatte dai produttori non

miglioreranno, le misure fatte da un laboratorio indipendente saranno l'unico aiuto utile per effettuare una scelta di un certo tipo di modulo. Per poter però migliorare ulteriormente il confronto tra diversi moduli sarà anche necessario intensificare gli studi statistici. Ciò vuol dire che si dovrà aumentare il numero di moduli da testare e di conseguenza ridurre il tempo di prova. Per questa ragione è stato sviluppato un metodo di pronostico della resa energetica che permetterà di confrontare la produzione dei diversi moduli. Il pronostico dovrà però basarsi principalmente su uno dei metodi di misura velocizzati proposti. Le misure a lungo termine sono comunque indispensabili per convalidare il metodo di pronostico della resa energetica, nel nostro caso il metodo delle matrici”, e per studiare il comportamento a medio termine di quelle tecnologie il cui pronostico non è ancora possibile con la stessa precisione con cui è possibile per il silicio cristallino.

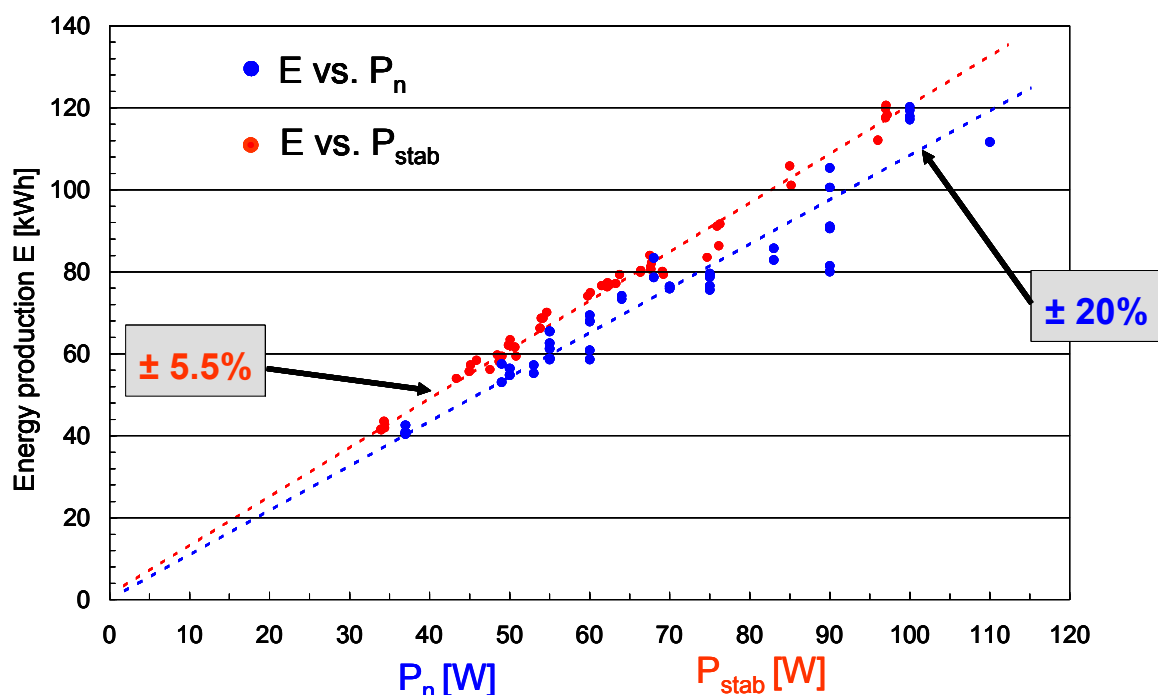


Figura 60: Energia prodotta [kWh] in un anno dai moduli del ciclo 7 e ciclo 8 in dipendenza della loro potenza nominale P_n e stabilizzata P_{stab} .

4.10.12 Metodo per la prima stima della produzione d'energia di un modulo a silicio cristallino

Nel caso che si vuole avere una stima iniziale (precisione del $\pm 5\%$) di quanto un modulo cristallino produce a certe condizioni climatiche, un metodo semplice e veloce è disponibile. Da Figura 60 si vede che è possibile rappresentare l'energia prodotta da un modulo nella forma

Equazione 8

$$E = e \cdot P_{stab}$$

Il coefficiente “e” equivale all'energia prodotta per Watt di modulo a determinate condizioni climatiche. Ogni località, assieme alla struttura di montaggio e la posizione del modulo, è definita da un suo coefficiente “e”. Il coefficiente può essere calcolato moltiplicando i singoli elementi di una matrice standard, media di tutte le matrici misurate e normalizzate a 1Watt degli ultimi cicli di test, con i singoli elementi di una matrice meteo. Di conseguenza, conoscendo la potenza reale stabilizzata di un modulo e calcolando il coefficiente “e”, l'energia E può essere direttamente calcolata con un precisione di circa il $\pm 5\%$. Ciò significa che al posto di una misura relativamente lunga e complessa della matrice di potenza, una singola misura della potenza stabilizzata a STC è sufficiente per fare una prima stima della resa energetica di un modulo. Per verificare la fattibilità e la precisione di questo metodo si prevede di continuare lo studio statistico inserendo il maggior numero possibile di dati misurati. Per i film sottili un studio simile non è fino ad ora possibile a causa di un minor numero di dati sperimentali e a causa della difficoltà di determinare una potenza stabilizzata per questo tipo di materiale.

4.10.13 Conclusioni

Un metodo per il calcolo della resa energetica denominato metodo delle matrici è stato sviluppato e la sua precisione è risultata buona.

Per lo sviluppo è stato indispensabile basarsi sulle misure del stand di prova che hanno permesso di convalidare il metodo attraverso l'energia annuale monitorata dei singoli moduli.

È stato inoltre provato che un periodo di misura ridotto a poche settimane può essere sufficiente per una caratterizzazione completa di un modulo al silicio cristallino.

Diversi metodi velocizzati per la caratterizzazione della matrice di potenza sono stati messi in confronto e sono risultati come adatti.

Il prossimo obiettivo è quello di adattare i due sistemi di misura già esistenti al LEEE-TISO, l'inseguitore solare e il simulatore solare, a delle misure rapide della matrice di potenza. In questo modo si avrà la possibilità di misurare un numero più grande di moduli presenti sul mercato.

In una fase iniziale sarà però necessario verificare il corretto funzionamento dei nuovi sistemi di misura velocizzati. A questo scopo si ha deciso di acquistare nella procedura di collaudo standard del laboratorio, 3 moduli, invece dei 2 attuali. Due moduli saranno installati come in passato sugli stand di prova e il terzo modulo sarà caratterizzato con gli altri sistemi a corto termine. Il confronto fra di loro, la misura di un anno sullo stand, la misura di ca. 2 settimane sull'inseguitore solare e la misura indoor a diverse temperature e irraggiamenti, darà la possibilità di offrire la misura della matrice di potenza di moduli c-Si come servizio per terzi.

Per il silicio cristallino l'obiettivo principale è quello di pubblicare la procedura completa per il calcolo della resa energetica aggiornando di continuo la banca dati dei moduli collaudati.

Nel caso delle altre tecnologie il confronto tra i diversi sistemi di misura serviranno ad un studio più approfondito del loro comportamento. Le misure a medio termine (15 mesi) sono indispensabili per monitorare il comportamento delle nuove tecnologie in diretto confronto con il silicio cristallino tradizionale e per intensificare lo studio di quelle tecnologie il cui pronostico non è ancora possibile con la stessa precisione con cui è possibile per il silicio cristallino.

Per il silicio amorfo è stato per esempio dimostrato che un pronostico è molto più complesso di quello del c-Si e che è necessario includere nella simulazione, non solo la matrice di potenza istantanea, ma anche la variazione della potenza @ STC in dipendenza delle condizioni climatiche del luogo, includendo anche le variazioni spettrali che a causa della risposta spettrale diversa dal silicio cristallino possono avere un'influenza importante. A questo scopo la misura dello spettro solare sarà reintrodotta al LEEE-TISO come parametro meteo.

Come dimostrato da diversi risultati un isolamento termico o una certa struttura di montaggio può influenzare la resa energetica di un modulo in modo sia positivo che negativo a dipendenza del tipo di materiale e delle condizioni climatiche esistenti sul luogo. Degli studi preliminari e delle prime proposte sono state fatte per introdurre un pronostico della resa energetica che tiene conto non solo del tipo di modulo ma anche del tipo di struttura di montaggio. Una continuazione di questo lavoro è previsto all'interno di questo progetto.

In un sistema PV il modulo è l'elemento principale ma non l'unico. Il passo successivo per un calcolo complessivo della resa energetica di un impianto PV sarà quello di integrare nel pronostico l'ondulatore.

REFERENCES

- [1] D. Chianese, N. Cereghetti, A. Realini, S. Rezzonico, G. Travaglini, “Energy Rating of PV Modules”, *Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference, Munich*, (2001).
- [2] G. Friesen, D. Chianese, S. Rezzonico, A. Realini, N. Cereghetti, and E. Burà “Matrix method for energy rating calculations of PV modules”, *Proceedings of the PV in Europe Conference, Rome*, (2002).
- [3] G. Friesen, D. Chianese, A. Realini, S. Rezzonico, N. Cereghetti, E. Burà, “Module Energy Rating: the Matrix Method”, *Simposio fotovoltaico nazionale svizzero, Lugano-Trevano*, (2002).
- [4] D. Chianese, N. Cereghetti, G. Friesen, E. Burà, A. Realini and S. Rezzonico, “Power and Energy Production of PV Modules (Cycle 8)”, *Proceedings of the PV in Europe Conference, Rome*, (2002).
- [5] D. Anderson, T. Sample, E. Dunlop, “Obtaining Module Energy Rating from Standard Laboratory Measurements”, *Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference, Munich*, (2001).
- [6] R. P. Kenny, E. D. Dunlop, T. Sample, K. Reitz, D. Anderson, “Energy Rating of Diverse PV Module Technologies Through Indoor and Outdoor Characterisation”, *Proceedings of the PV in Europe Conference, Rome*, (2002).
- [7] W. Durisch, J. Urban, G. Smestad, „Characterisation of Solar Cells and Modules under Actual Operating Conditions”, *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver*, (1996).
- [8] D.L. King, “PV Module and Array Performance Characterization Methods for all system Operating Condition”, *NREL/SNL PV Program Review Meeting*, (1996).
- [9] D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, and W.I. Bower, “Field Experience with a new Performance Characterization Procedure for Photovoltaic Arrays”, *Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna*, (1998).
- [10] Meteonorm, www.meteotest.ch
- [11] R.P. Kenny, G. Friesen, D. Chianese, A. Bernasconi, and E.D. Dunlop, “Energy Rating of PV modules: comparison of methods and approach”, *Proceedings of the 3d World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Osaka*, (2003).
- [12] J.H. Wohlgemuth and S. Ransome, “Performance of BP Solar Tandem Junction Amorphous Silicon Modules”, *29th IEEE PVSC, New Orleans*, (2002).
- [13] S. Ransome et al., “Analysis of measured kWh/kWp from grid tied systems – modelling different technologies worldwide with real data, 17th EPVSEC, Munich, (2001).
- [14] D.L. King et al., “Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems”, *29th IEEE PVSC, New Orleans*, (2002).

4.11 Riassunto conclusioni: misure a medio termine

Gli scopi delle misure a medio termine in condizioni ambientali reali di funzionamento (outdoor) erano:

- Verificare i parametri elettrici dei moduli, dichiarati dai fabbricanti.
- Quantificare il degrado iniziale dei moduli presenti sul mercato.
- Verificare la stabilità elettrica dei moduli in esame.
- Verificare/studiare il comportamento dei moduli a condizioni reali (PR, Gdiff, ...)
- Quantificare e confrontare la produzione di energia delle tecnologie collaudate.
- Determinare e verificare metodi semplificati di pronostico della resa energetica.

Modifica della procedura di test e misure di potenza

- La procedura di collaudo dei moduli PV è stata modificata per tener conto delle osservazioni ottenute nei test:
 1. I moduli al silicio c-Si subiscono un degrado di ca. il -2% nel corso delle prime ore di esposizione alla luce => 20kWh/m² di light soaking. Dopo 3 mesi il degrado medio è del -2.7%.
 2. I moduli thin film si stabilizzano dopo almeno tre mesi di esposizione alla luce => La durata dei test è ora di: 3+12 = 15 mesi.
 3. I moduli in test sono misurati a STC ogni 3 mesi nel nuovo simulatore solare del LEEE-TISO accreditato ISO17025.
 4. I parametri di funzionamento dei moduli (Im, Vm, Tbom) e climatici sono misurati ogni 1 minuto con il nuovo sistema di acquisizione dati.
 5. Il degrado avviene essenzialmente in Isc. A partire dai 3 mesi di esposizione non si nota nessun ulteriore degrado, la potenza è stabile.

Garanzie dei moduli:

- Nel corso degli ultimi anni i fabbricanti hanno modificato i **limiti** e i **riferimenti** della garanzia sulla potenza.
- Quasi tutti i fabbricanti hanno introdotto una tolleranza di produzione. Alcuni fabbricanti riferiscono la garanzia a lungo termine rispetto a Pmin, rendendo difficile un confronto tra i moduli.
- Per un pronostico della resa energetica è più giudizioso utilizzare il valore della potenza minima dichiarata (Pmin) piuttosto che la potenza nominale (Pn).

Confronto della resa energetica:

- Le differenze di produzione **annuale** dei moduli sono elevate se riferite alla **potenza nominale Pn** (differenza "commerciale"), perché la potenza reale non corrisponde alla potenza nominale.
- Per i moduli al silicio cristallino le differenze possono arrivare fino al **16%**.
- Le differenze di produzione **annuale** dei moduli sono più limitate se riferite alla **potenza reale misurata e già stabilizzata P15** (differenza "tecnologica).
- Per i moduli al silicio cristallino le differenze possono arrivare fino al **7%**.
- Il fabbricante che dichiara una potenza nominale conforme alla potenza reale stabilizzata, è premiato con una resa energetica superiore (riferita alla potenza nominale).

Comportamento in condizioni reali:

- La produzione istantanea e mensile è invece più differenziata e le differenze sono più marcate nei periodi a bassa insolazione. Tuttavia la produzione annuale è limitata in questa frazione di insolazione e nei sistemi collegati alla rete questo dato non è determinante. Questi dati sono invece interessanti in caso di utilizzo dei moduli solo in determinati periodi dell'anno come nel caso dei sistemi autonomi.

Metodo delle matrici per il pronostico della resa energetica:

- Un metodo per il calcolo della resa energetica denominato **metodo delle matrici** è stato sviluppato e la sua precisione è risultata buona.
- Il metodo delle matrici è utilizzabile con un semplice foglio di calcolo elettronico (stile Excel).
- Per lo sviluppo del metodo ci si è basati sulle misure dello stand di prova che hanno permesso di validare il metodo attraverso l'energia annuale monitorata dei singoli moduli.
- Un periodo di misura ridotto a poche settimane può essere sufficiente per una caratterizzazione completa di un modulo al silicio cristallino.
- Le misure a medio termine (15 mesi o 27 mesi) sono indispensabili per monitorare il comportamento delle nuove tecnologie in diretto confronto con il silicio cristallino tradizionale e per intensificare lo studio di quelle tecnologie il cui pronostico non è ancora possibile con la stessa precisione con cui è possibile per il silicio cristallino.

5 MISURE A LUNGO TERMINE OUTDOOR

5.1 Abstract (in English)

TISO 10kW c-Si Plant

- The plant is still operating after nearly 22 years of working life
- Despite numerous traces of mechanical degradation and a persistent increase in the number of infiltrations, the modules are still functioning correctly. On the other hand, the inverter, after only 12 years of operation, had to be substituted by 3 string-inverters.
- Despite numerous interruptions due to special measurements, the age of the plant, a non-optimal degree of tilt and an oversized inverter, the production figures were above the Swiss average in 2000.
- The stability of these modules is also confirmed by the STC measurements on the 18 reference modules. Their average power (leaving out the 3 most unstable modules) is still 33.9W and, with respect to that measured in 1982, has decreased by only 4.2% (-8.1% with respect to the nominal value supplied by the manufacturer). This difference in power is lower than that of a number of modules of recent manufacture, which at STC do not even respect the guarantee limits at the moment of purchase.
- This loss of power corresponds to an average degradation of 0.2% a year.
- In the last 3 years the plant has been analysed with particular interest : in collaboration with the JRC in Ispra a study has been carried out to determine 'Mean Time Before Failure' (MTBF).

TISO 4kW a-Si Plant

- The first generation single-junction a-Si modules, from more than 15 years ago, had undergone more than 25% degradation in the first few months of activity with respect to initial working performance. In the following 15 years there was further degradation, averaging 10% - 15%, corresponding to an annual degradation of around 0.7%.
- The plant is still in operation after 16 years of exposure.
- The degradation and regeneration cycles continue with the same amplitude as in previous years
- In the last few years a general decrease in degradation has been observed
- String 1 (reference) has remained fairly stable over the past two years, and is now at the same level as the best of the other series
- String number 7, completely insulated thermally in 1998, shows an improvement in efficiency from 6% to 12%. Instability and variations between modules make comparison difficult.
- Thermal insulation and the consequent increase in temperature, does not prevent the general degradation of the modules. In fact, string number 7 also shows a loss in efficiency

TISO a-Si triple-junction 0.5 kW Plant

- The TISO 0.5kW plant has been in operation for almost 6 years
- Unlike the a-Si plant with old-generation modules, its operating efficiency is stable, oscillating between 6 to 6.8%

TISO Plant for educational purposes

- Using modules which finished their test cycle, some small grid-connected and independent plants have been set up for educational purposes.

Grid-connected PV plants in Ticino

- 32 plants are currently registered, for a total power of 472.12 kWp. The plants set up using Cantonal subsidies haven't been included yet.
- From the data obtained until now, the main cause for breakdowns and abnormalities is the inverter. During the last 3 years, the LEEE has had to substitute the inverter of 5 plants
- In 2001 the LEEE-TISO was involved in the restoration of the 103.7 kW Riazzino Plant as well as its detailed monitoring, which is still ongoing

5.2 Impianto TISO 10kW sc-Si, 20 anni di attività

5.2.1 Introduzione

L'impianto fotovoltaico TISO10 con moduli al silicio monocristallino è in funzione da più di 21 anni e ha prodotto oltre 134 MWh (vedi Figura 61). L'impianto è uno degli unici al mondo di cui si dispone di osservazioni dettagliate sul lungo termine ed è stato il primo in Europa ad essere allacciato alla rete. L'osservazione della fine del ciclo di vita dei moduli dell'impianto TISO da 10kWp ci permette di verificare le ipotesi di affidabilità e di durata utilizzate pure nei calcoli economici.

Nel corso degli ultimi 3 anni, questo impianto è stato analizzato con particolare interesse: in collaborazione con il Centro Comune di Ricerca Europeo di Ispra (JRC EC Joint Research Centre - ESTI) è stato effettuato uno studio volto a determinare il "Mean Time Before Failure" (MTBF). L'obiettivo del lavoro era di investigare sui meccanismi di degrado dei moduli, rispettivamente sull'affidabilità e la durata di vita effettiva degli stessi in condizioni reali di funzionamento. I test, iniziati in aprile 2000, sono terminati in luglio 2003. Per una discussione dettagliata sul degrado e sull'analisi visiva si rimanda quindi ai rapporti annuali del progetto BBW 99.0579.

5.2.2 Produzione di energia e comportamento in condizioni reali

L'impianto PV da 10kWp con moduli m-Si, giunto ormai al suo 21-esimo anno di vita, è ancora operativo. Mentre i moduli funzionano a pieno regime l'ondulatore, dopo soli 12 anni di esercizio, ha iniziato a dare segni di malfunzionamento, e sta per essere sostituito. Dal 1983 al 2002 l'impianto ha prodotto complessivamente 134'337kWh (malgrado numerose interruzioni dovute a lavori di manutenzione e prove), energia che permetterebbe di percorrere con un'auto elettrica leggera (Twike) due milioni di chilometri.

Nel 2000 l'impianto ha prodotto 8'129 kWh, il 6% in meno rispetto all'anno precedente (praticamente a parità d'insolazione totale). Ciò è dovuto al fatto che l'impianto ha operato per ca. 2 settimane con 2 serie scollegate a causa di misure particolari. Tuttavia l'impianto, pur avendo quasi 20 anni, un ondulatore sovradimensionato (la potenza nominale dell'ondulatore è di 15kW, di molto superiore alla potenza dei moduli, non permette di raggiungere rendimenti elevati) ed un'inclinazione non ottimale, nel 2000 ha fatto registrare un indice di produzione di 872 kWh/kWp: questo indice ha superato anche nel 2000 il valore della media Svizzera dell'ultimo decennio di 820 (media Svizzera '99: 770).

Nel 2001 e nel 2002 l'impianto ha prodotto 7'744 kWh, rispettivamente 7'422kWh. La minor produzione rispetto agli anni precedenti è dovuta al malfunzionamento dell'ondulatore (vedi sotto) e al fatto che l'impianto è stato smontato completamente per la misura di tutti i moduli a STC (dal 26/02/01 al 08/04/01); per questi anni non è quindi stato possibile confrontare l'indice di produzione annuo con quello della media Svizzera.

I dati di produzione relativi agli ultimi 6 anni sono riassunti nella Tabella 17.

Anno	Insolazione [kWh/m ²]	Energia ac [kWh]	PR [%]	Yf [kWh/kW]
1997	1552.2	9022	62.3%	968
1998	1550.9	9624	66.6%	1032
1999	1437.1	8646	64.5%	927
2000	1404.7	8129	62.1%	872
2001	1450.4	7744	57.3%	831
2002	1407.1	7422	56.6%	796

Tabella 17: Principali indici di funzionamento dell'impianto TISO 10kW negli ultimi 6 anni.

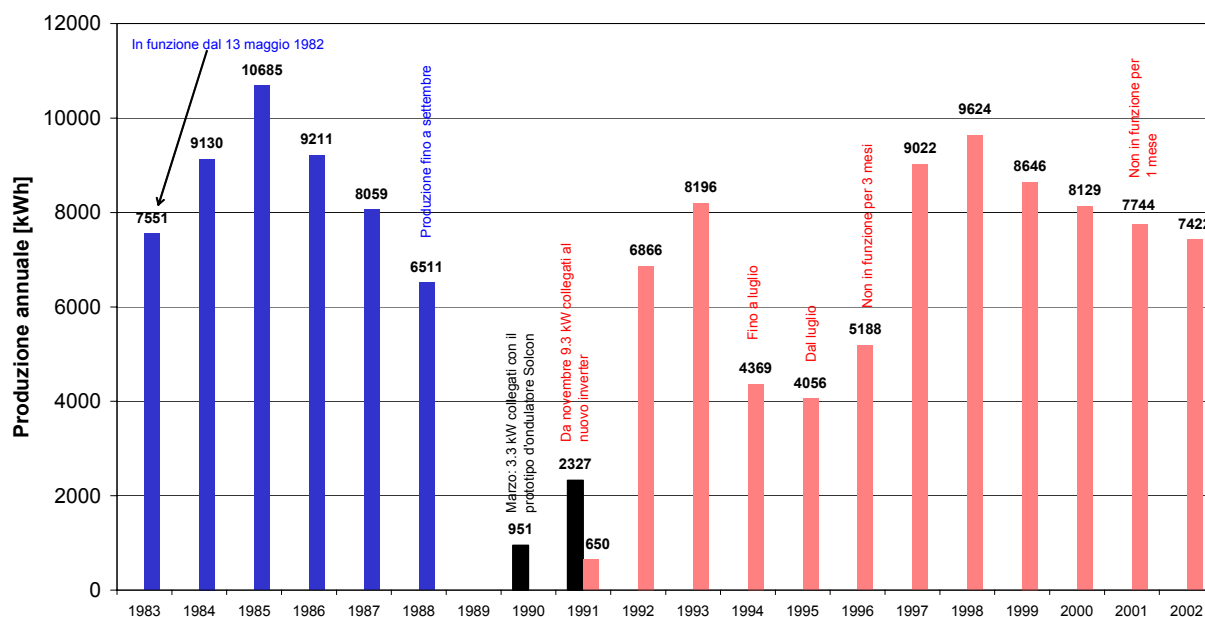


Figura 61: Energia prodotta dell' impianto TISO10kW in 20 anni di funzionamento: in totale 134'337 kWh.

Il PR dell'impianto mostra variazioni stagionali dovute alle escursioni della temperatura di esercizio dei moduli (Figura 62). Come negli anni precedenti, la differenza tra PR_{dc} e PR_{ac} è più elevata in estate che in inverno. Questo può essere attribuito a una diminuzione del rendimento dell'ondulatore in estate, legata per esempio alla temperatura di funzionamento dell'ondulatore stesso (influsso negativo delle temperature elevate sugli elementi di potenza) o alla diversa distribuzione dell'insolazione estate-inverno vista dall'impianto (nel corso della giornata). In altre parole d'estate spesso l'ondulatore funziona per più tempo, ma a carico inferiore, quindi a rendimento inferiore.

Nel 2000 il valore del PR_{dc} oscilla tra il 68% ed il 91% (PR_{dc} medio 78.2%), rispettivamente quello di PR_{ac} varia tra il 51% e l'81% (PR_{ac} medio 64.3%). L'andamento globale del PR è analogo a quello degli anni precedenti.

Nel corso del 2001 invece l'andamento del PR globale (sia ac che dc) dell'impianto non è stato analogo a quello degli anni precedenti. Infatti, mentre gli scorsi anni le oscillazioni erano sempre comprese tra il 70% e il 90% per il PR_{dc} , rispettivamente tra il 50% e l'80% per il PR_{ac} , a partire da metà settembre 2001 il PR non ha continuato la sua "crescita", stabilizzandosi a ca. 83% (dc) rispettivamente 67% (ac). Dalle prime analisi è emerso subito che ciò è dovuto a problemi sul semicampo negativo che eroga una potenza inferiore rispetto a quello positivo (minor corrente, maggior tensione +50Vdc) (vedi Figura 62 e Figura 63). L'anomalia non è comunque da attribuire alla parte DC, bensì all'ondulatore che non riesce a fare lavorare il semicampo negativo al suo punto di massima potenza.

Nel 2002 e nel 2003 la diminuzione di PR del semicampo negativo, iniziata in settembre 2001, è continuata. Malgrado metà impianto funziona correttamente, l'inefficienza del semicampo negativo è sempre più evidente e compromette ora in modo importante il PR complessivo (Figura 63).

Si è perciò deciso di sostituire l'ondulatore Ecopower, in funzione dal 1991, con 3 string-inverter Sunny Boy SWR 2'500 della ditta SMA (Pac nominale = 2.2 kW; Pac max = 2.5 kW) che saranno installati direttamente all'esterno, uno per campo. Per il nuovo cablaggio si dovranno completare i campi con i moduli mancanti, in modo da avere 12x8=96 moduli collegati ad ogni ondulatore. La nuova configurazione permette di sfruttare l'energia prodotta da tutti i moduli, rispettivamente di evitare problemi di sovradimensionamento dell'ondulatore: infatti la potenza nominale degli ondulatori equivale al 70% (80% se si considera Pmax) della potenza DC, visto che ogni campo erogherà mediamente 3.168 kWdc, e l'impianto 9.504 kWdc.

Il primo nuovo ondulatore è in funzione da luglio 2003, e attualmente solo 2/3 del campo sono collegati al vecchio ondulatore. Naturalmente l'acquisizione dati continuerà, ma il sistema sarà modificato in modo da permettere la rappresentazione dei dati anche secondo il formato IEA, e facilitare così il confronto con i dati di funzionamento di altri impianti collegati alla rete (IEA PVPS Task2 Database, "Operational performance, maintenance and sizing of PV power systems").

Fra i dati registrati è importante, in particolare, la costante osservazione del PR, che tra l'altro ha permesso di notare immediatamente il calo di rendimento dell'impianto dovuto al guasto summenzionato del

2001. La natura del guasto ha evidenziato, ancora una volta, d'un lato la stabilità e l'affidabilità nel tempo dei moduli ARCO ASI16-2300, dall'altro il punto debole di un impianto: l'ondulatore.

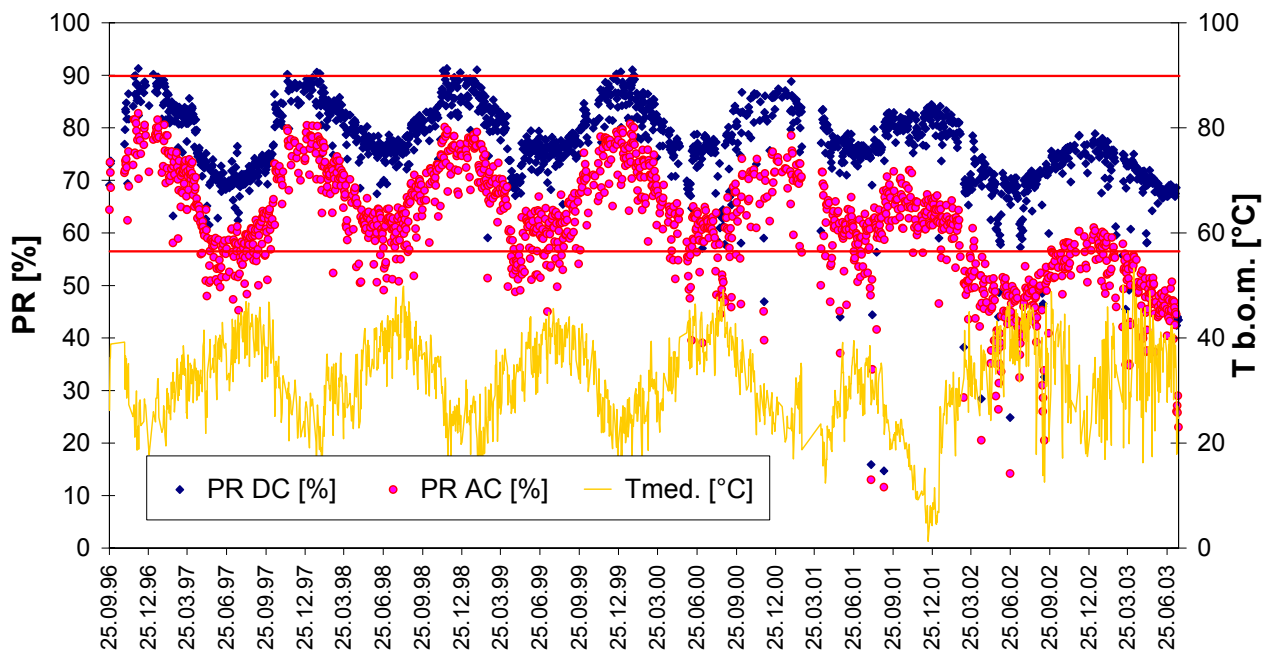


Figura 62: PR_{dc} , PR_{ac} e T media l'impianto TISO 10 kW (Giorni con $H > 2.5$ kWh/m², PR_{dc} , $PR_{ac} > 45\%$)

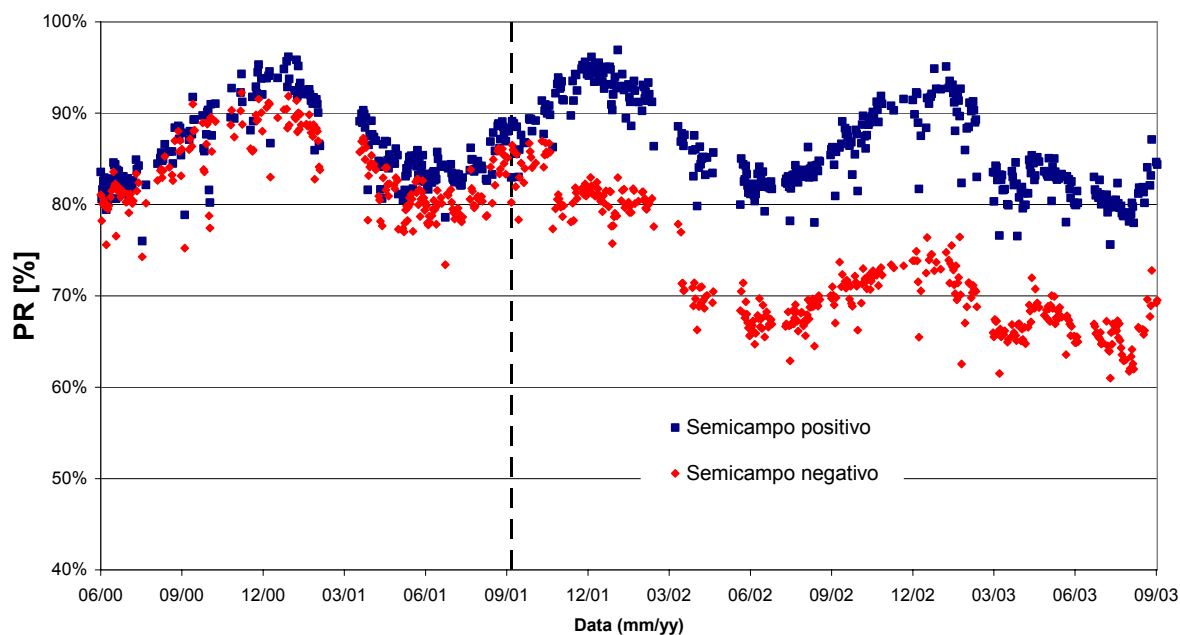


Figura 63: PR_{ac} dell'impianto TISO 10 kW, dettaglio: semicampo positivo e semicampo negativo con problemi di funzionamento da settembre 2001

5.2.3 Misure @ STC sui moduli di riferimento

Nel corso del progetto sono continuate le misure @STC sul campione di 18 moduli di riferimento che da 21 anni viene periodicamente sottoposto a test.

Grazie all'analisi visiva sono state riscontrate numerose tracce di degrado meccanico ed in particolare un persistente aumento delle infiltrazioni nei moduli; tuttavia la considerevole crescita dei difetti ha compromesso in modo evidente il rendimento elettrico di pochi moduli: la maggior parte continua a funzionare correttamente.

Come mostra la Figura 65, solo 3 moduli mostrano un degrado iniziato nel 1988, che ha raggiunto, dopo diversi saliscendi, rispettivamente il 14.6%, il 21.0 % e il 24.6 % (differenza di potenza rispetto a quella misurata nel 1982). Questi 3 moduli presentano diversi difetti, tra cui importanti segni d'infiltrazioni d'acqua che sono la causa, molto probabilmente, della loro instabilità. La Figura 64 mostra l'evoluzione di un'infiltrazione su uno di questi moduli (sn 146872) dal 2001 al 2002.

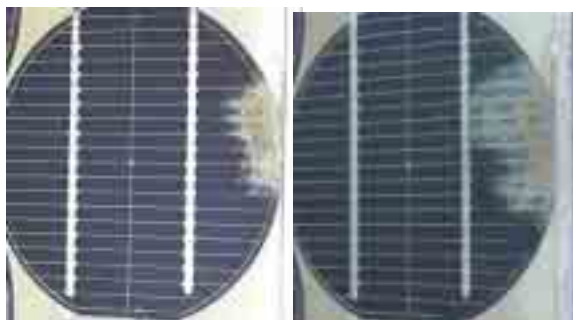


Figura 64: Evoluzione di un'infiltrazione in uno dei 3 moduli di riferimento più danneggiati, dal 2001 (a sinistra) al 2002.

Gli altri 15 moduli di riferimento sono invece rimasti stabili: per 17 anni, fino al 1999, non hanno subito un degrado elettrico al di fuori dei limiti di precisione della misura (errore di misura 2%). Negli ultimi 4 anni è stato misurato, anche su questi moduli, un leggero calo di potenza, dovuto all'aumento generale dei difetti riscontrati. Tuttavia la loro potenza media è ancora di 33.9W e, rispetto a quella misurata nel 1982, è diminuita soltanto del 4.2% (-8.1% rispetto al valore nominale fornito dal fabbricante). Ciò corrisponde ad una diminuzione media dello 0.2% all'anno.

A titolo di confronto, parecchi moduli di fabbricazione recente @STC non rispettano neppure i limiti di garanzia già al momento dell'acquisto (vedi capitolo 4).

La diminuzione di potenza del febbraio 1997 (potenza media -1.37%) è probabilmente dovuta a un errore sistematico nella misura, in quanto lo stesso si produce per tutti i moduli.

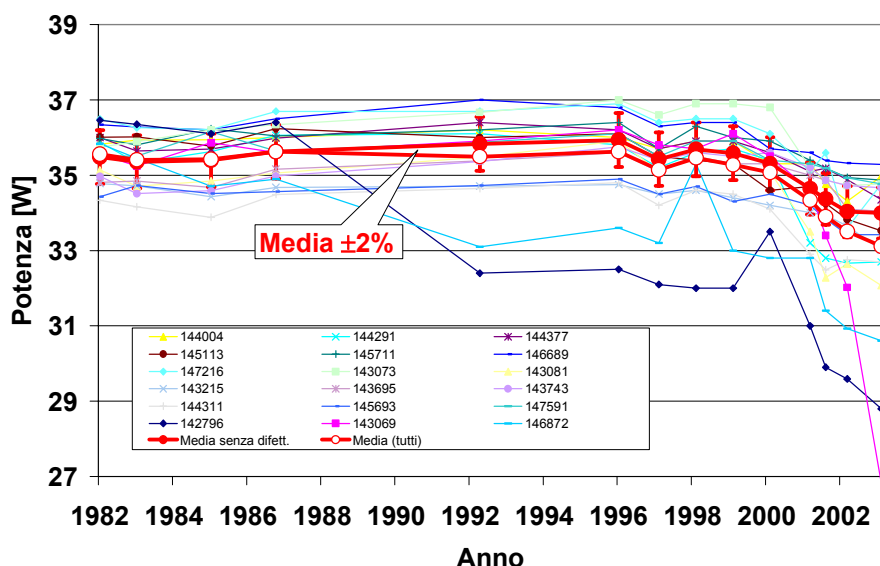


Figura 65: Potenza @STC dei 18 moduli di riferimento e valore medio, dal 1982 al 2003. Il valore medio è stato calcolato con e senza i 3 moduli che sono degradati; inoltre è riportato l'errore medio di misura.

5.3 Impianto TISO 4kW a-Si

5.3.1 Produzione di energia e comportamento in condizioni reali

Al suo sedicesimo anno di funzionamento, l'impianto PV con moduli al silicio amorfo ARCO G4000 (1988) è sempre funzionante.

Nel 2001 l'impianto è stato fermo per un periodo di 1.5 mesi a causa di un guasto all'ondulatore avvenuto durante il periodo estivo. L'ondulatore (Sunrise Maxi - Fronius), era stato installato nel giugno dell'anno precedente, e quindi ha subito un guasto appena un anno dopo la messa in funzione. Di conseguenza la produzione globale dell'impianto nel 2000 e nel 2001 risulta inferiore agli altri anni.

La Tabella 18 riassume la produzione dell'impianto negli ultimi 4 anni.

Anno	Energia [kWh]	Final Yield Yf [kWh/kWp]
2000	1961	681
2001	1819	632
2002	2085	724
2003	2275	790

Tabella 18: Produzione di energia negli ultimi 4 anni dell'impianto TISO 4kW (nota: $P_n=2.87\text{kW}$, ma $P_{eff} \leq 2\text{kW}$).

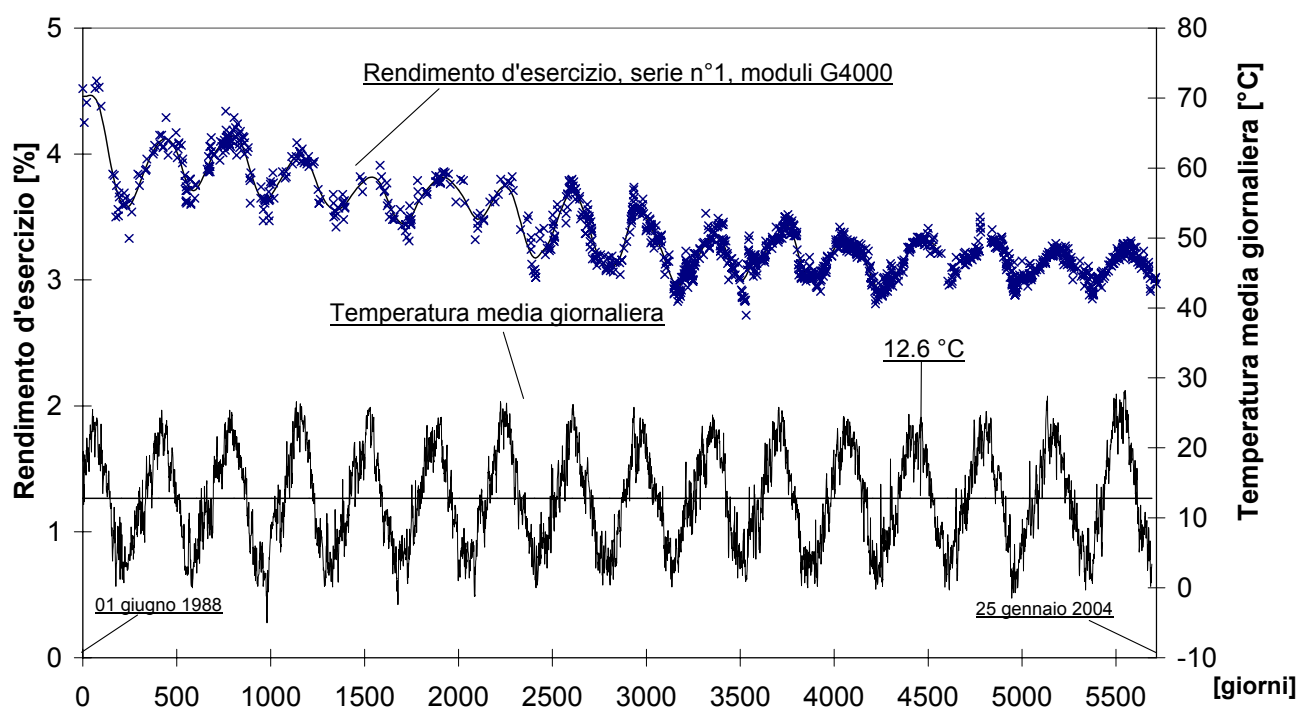


Figura 66: Rendimento d'esercizio della serie no.1 dell'impianto da 4 kW a-Si (giornate con $G_i > 800\text{W/m}^2$)

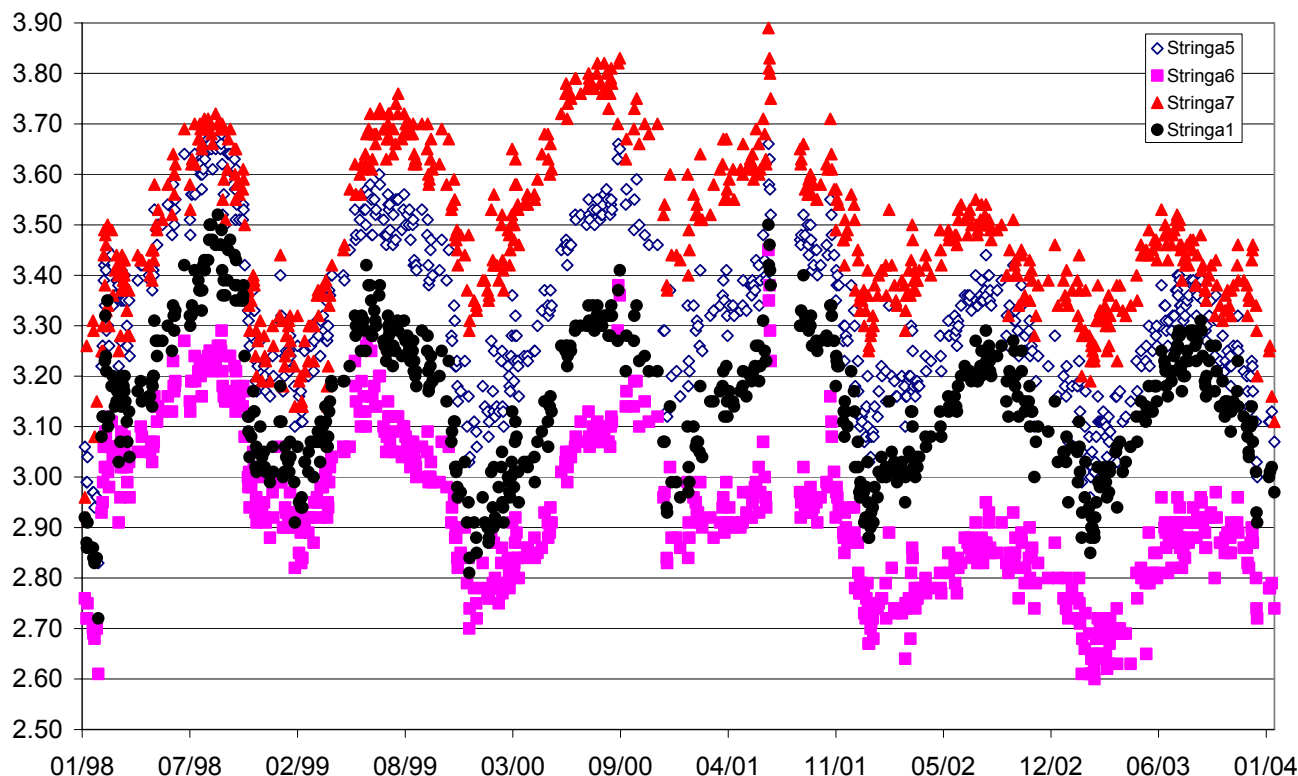


Figura 67: Rendimento d'esercizio delle serie n° 1,5,6 e 7 dell'impianto da 4 kW a-Si (giornate con $G_i > 800\text{W/m}^2$)

I cicli di degrado e rigenerazione continuano come per gli anni precedenti.

Fino al 2001 l'andamento dei cicli è continuato in modo costante con una tendenza alla diminuzione progressiva dei valori annuali di punta. Negli ultimi 2 anni invece (vedi Figura 66) non si nota un'ulteriore diminuzione del rendimento medio d'esercizio e sembra che le oscillazioni si siano stabilizzate (Nota: l'andamento delle serie rispecchia l'andamento dei moduli peggiori di ogni serie).

5.3.2 Isolamento termico di una serie di moduli

La serie di moduli no. 7 isolata termicamente nel maggio del 1998 ha mostrato un rendimento d'esercizio migliore, rispetto alle altre serie, fino del + 12% (vedi Figura 68). Il comportamento delle singole serie è tuttavia diverso nei vari periodi dell'anno. In particolare è interessante notare come nei mesi di settembre e ottobre 2000, mesi particolarmente piovosi e freddi in modo continuato, il rapporto fra la serie isolata e le altre è rapidamente ritornato ai valori iniziali per un breve periodo di tempo per poi recuperare nei primi giorni di tempo soleggiato e caldo.

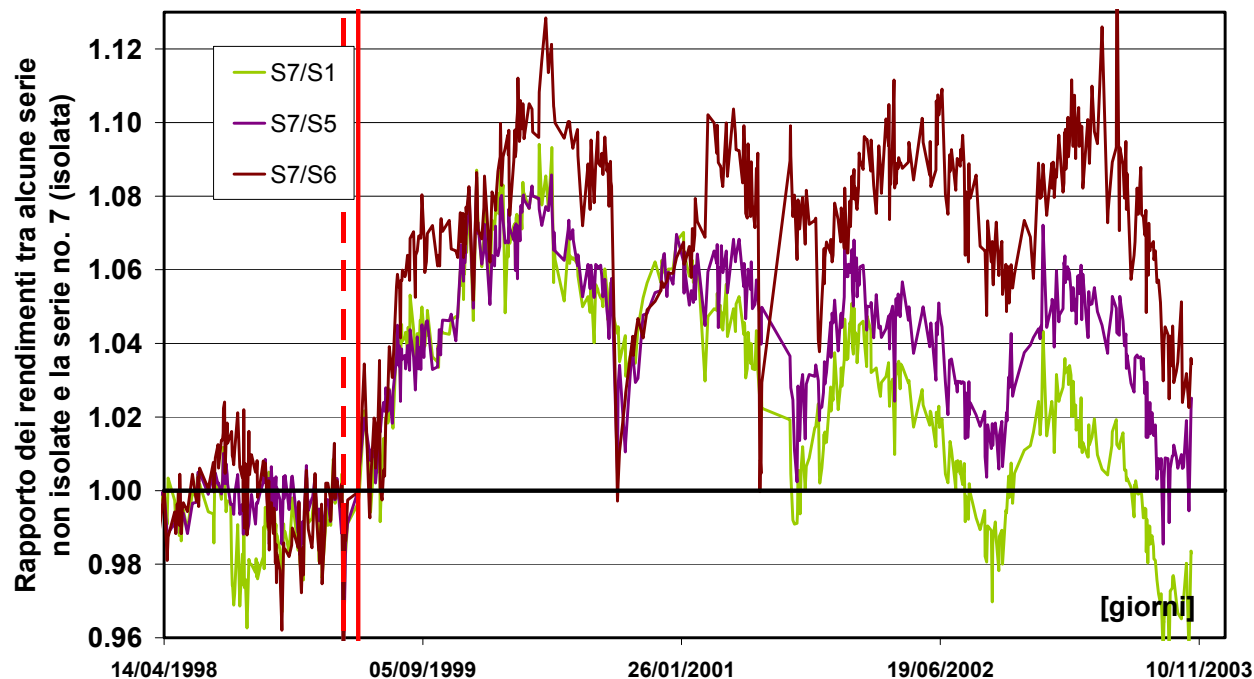


Figura 68: Relazione tra le serie non isolate (S1,S5,S6) e la serie (S7) isolata termicamente.

Se confrontata con la serie 6, le oscillazioni di rendimento della serie 7 variano tra +6% e +12%. Se confrontata con la serie 1, si osserva invece che le differenze si stanno viepiù annullando (Figura 68). Ciò si spiega con il fatto che la serie 1, negli ultimi 2-3 anni, è rimasta molto più stabile delle altre serie, le quali stanno al contrario continuamente degradando e in modo pressoché analogo (vedi Figura 67, Figura 69 e Figura 70).

5.3.3 Misure a STC sui moduli di riferimento

Il comportamento riscontrato in condizioni reali di funzionamento è confermato anche dalle misure in condizioni standard. Le misure effettuate regolarmente @ STC dal 1988 a Ispra mostrano chiaramente come i moduli della serie n° 1, negli ultimi anni, stiano degradando in modo meno rapido degli altri (vedi Figura 69 e Figura 70).

Infatti i moduli di riferimento G13 e G14 (della serie n° 8) fino al 1997 hanno mantenuto una potenza stabile sopra i 19 W (media dei due moduli). In seguito la loro potenza è diminuita bruscamente, fino al valore attuale di 14.75W. Il calo è stato del 18.1% rispetto al 1998 e del 13.7% rispetto al 1999 (vedi Figura 69).

La potenza media dei moduli della serie 1, di 20.1W fino al 1997, è attualmente di 16.0W. Anche per questi moduli, negli ultimi anni la potenza è quindi scesa ma in modo meno marcato rispetto a quella dei moduli G13 e G14: il calo è stato del 14.5% rispetto al 1998 e del 8.3 % rispetto al 1999 (vedi Figura 70).

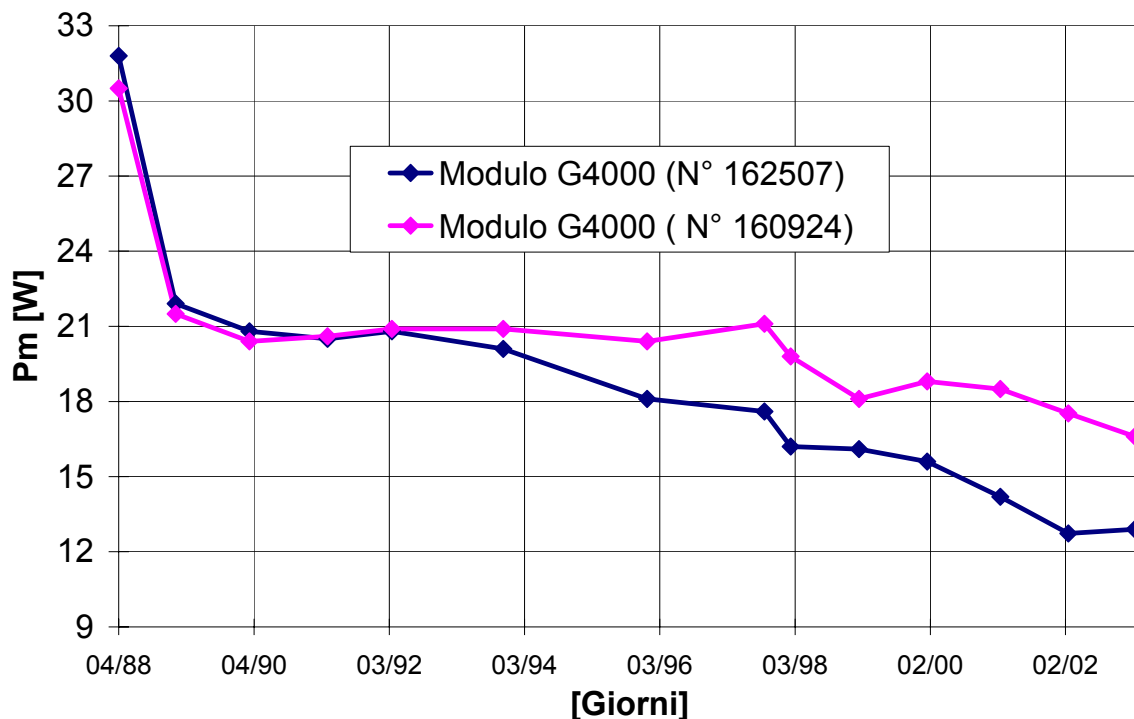


Figura 69: Misure di Pm @ STC dei 2 moduli di riferimento (G13 e G14) a Ispra, dal 1988 al 2003

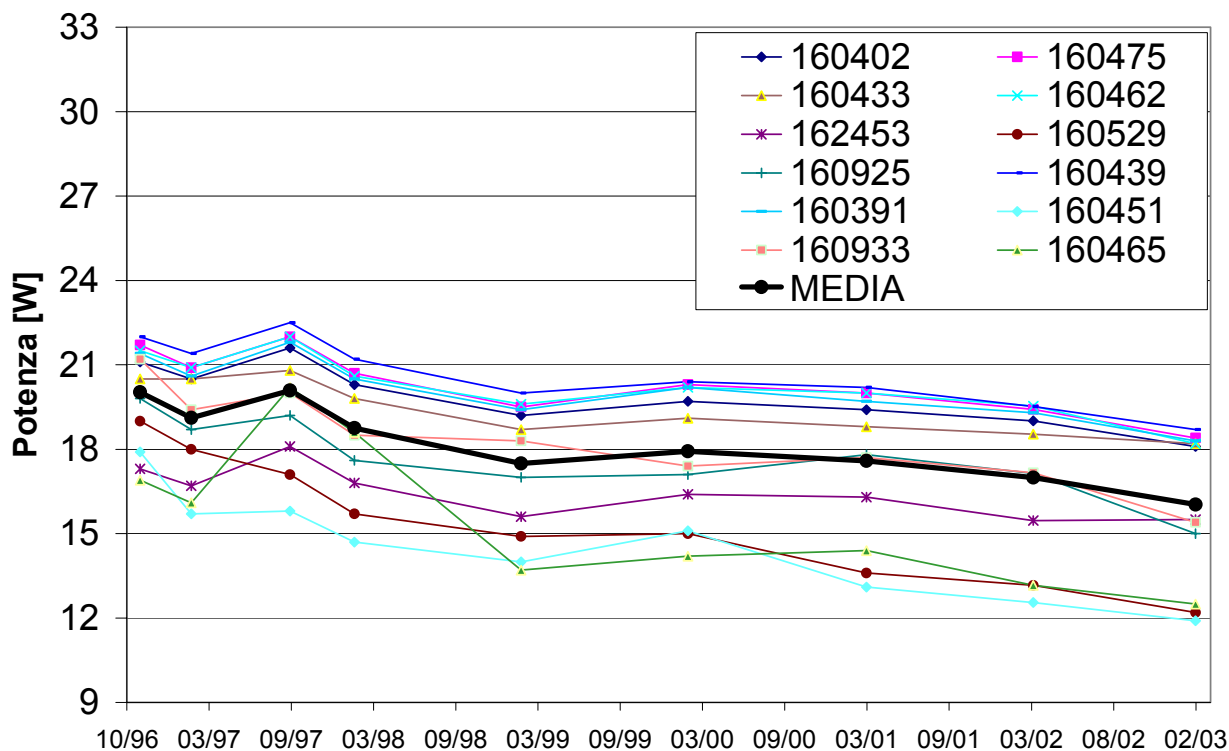


Figura 70: Misure di Pm @STC dei moduli della serie 1, dal 1996 al 2003

5.4 Impianto TISO 0.5kW a-Si triple-junction

L'impianto 0.5 kW con moduli a-Si triple-junction della ditta Canon (nel 1998 in Joint Venture con la ditta Uni-Solar) ha raggiunto quasi 6 anni di funzionamento ed il suo rendimento d'esercizio è sempre costante e la media oscilla tra il 6 e 6.8% (vedi Figura 71)

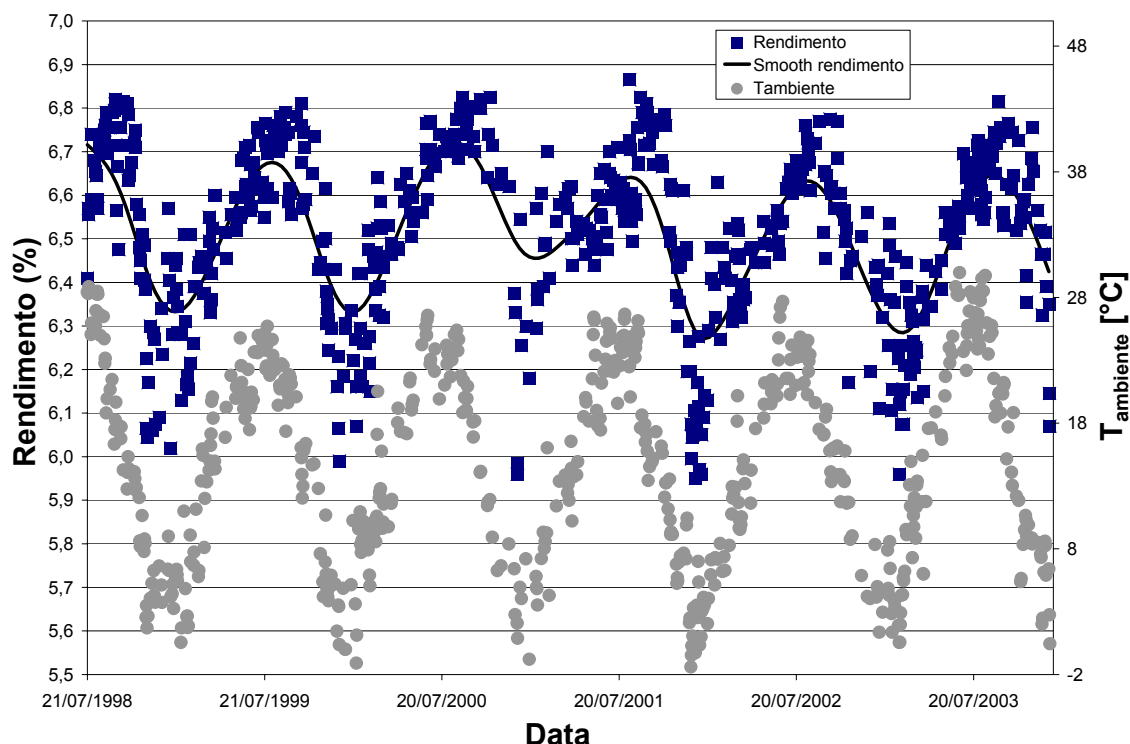


Figura 71: Rendimento medio d'esercizio delle due serie di moduli a-Si triple-junction e media giornaliera della temperatura ambiente.

Nel 2003 le condizioni climatiche favorevoli hanno contribuito ad una maggior produzione, specialmente in estate. La produzione media nei 5 anni (1999-2003) è stata di 486 kWh che equivale ad un indice produzione Yf di 958 kWh/kWp.

Mese	PVSYST	1998	1999	2000	2001	2002	2003
gennaio	29,4		31	33	17	32	27
febbraio	28,2		44	41	37	36	38
marzo	44,5		47	51	32	48	55
aprile	42,2		41	31	47	44	44
maggio	46,5		39	43	42	39	55
giugno	53,2		51	49	49	45	53
luglio	57,7	31	50	43	53	50	53
agosto	60,0	53	51	61	56	45	58
settembre	50,5	45	39	49	44	49	51
ottobre	40,0	40	32	27	35	41	38
novembre	26,7	36	33	20	38	21	25
dicembre	27,1	28	24	21	37	14	31
Totale	506	232	484	468	487	465	528

Figura 72: Produzione mensile d'energia e risultati della simulazione con PVSYST.

Contrariamente all'impianto con moduli al silicio amorfo della vecchia generazione (TISO 4kW), dove si è riscontrato un lento ma persistente degrado, il rendimento d'esercizio dell'impianto TISO 0.5kW è stabile.

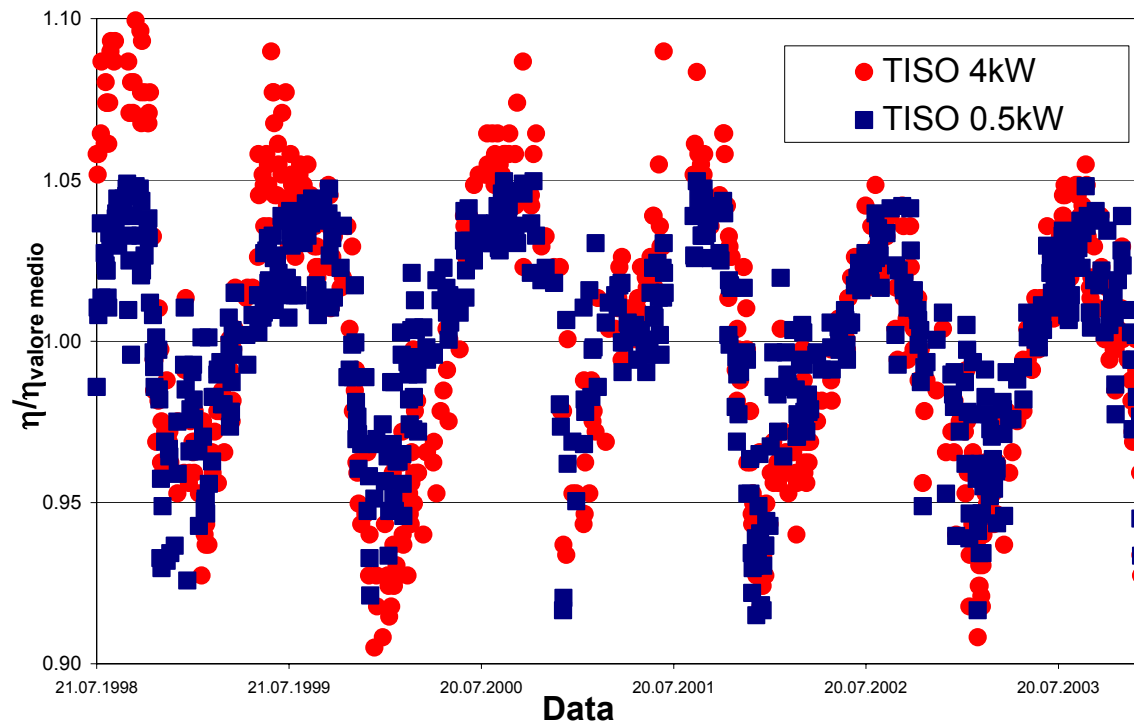


Figura 73: Rendimento d'esercizio degli impianti TISO 4kW e 0.5kW, normalizzato al valore medio del periodo.

5.5 Altri impianti TISO ad uso didattico

Allo scopo di rendere più completo il corso di “Tecnica fotovoltaica”, organizzato e preparato nell’ambito dei corsi formazione continua della SUPSI, è stato introdotto un capitolo di nozioni prettamente pratiche. Per questo motivo sono state allestite quattro “postazioni di lavoro pratico” che toccano le varie tipologie di impianto fotovoltaico. Queste postazioni hanno principalmente lo scopo di mostrare le varie configurazioni di montaggio e cablaggio pratico degli impianti nonché mostrare un esempio di differenti apparecchiature e componenti presenti sul mercato. Per mezzo di strumenti di misura è inoltre possibile verificare di persona il comportamento elettrico dei vari componenti (correnti, tensioni, forme d’onda,...). Le postazioni consistono in 3 impianti collegati alla rete e 3 impianti autonomi, descritti qua di seguito.

5.5.1 Impianti collegati alla rete

Sono stati costruiti tre piccoli impianti fotovoltaici monofase collegati alla rete ($P_{tot} = 1.9 \text{ kW}$), utilizzando i moduli che hanno terminato le prove e diversi tipi di ondulatori.

Per l’impianto più grande da 1 kWp è stato usato un ondatore FRONIUS Sunrise Mini-S adatto per il montaggio all’interno. Per il secondo impianto da 700W è stato impiegato un Sunny Boy 700, uno dei pochi tipi ancora utilizzabile all’esterno. L’ultimo impianto è composto da due moduli da 100W circa connessi ognuno con un mini “AC module inverter” OK-4E-100 direttamente montato vicino al modulo stesso. Anche per questo multi stand si è posto particolare attenzione al dimensionamento e alla scelta dei vari componenti principali e ai vari componenti di sicurezza quali cavi DC, disgiuntori DC e AC, scaricatori di sovratensione, fusibili, ecc... .



Figura 74: Stand di impianti allacciati alla rete, con ondatore DC/AC monofase (postazione 1)

Visto che questo multi stand è montato in modo permanente sul tetto dello stabile, i tre impianti sono in funzione a tempo pieno ed immettono energia elettrica nella rete pubblica. L’energia prodotta è misurata.

5.5.2 Impianti autonomi



Impianto “Stand alone” con tensione di sistema 12V DC

Questo stand consiste in un semplice impianto fotovoltaico con tensione di sistema 12V DC non collegato alla rete. Sono stati montati due tipi differenti di regolatori di carica ; uno di vecchia concezione con controllo di carica semplice e uno di concezione recente con controllo programmato dello stato di carica. Tramite dei commutatori è possibile selezionare e utilizzare o l'uno o l'altro di questi regolatori. Importante in questo tipo di impianto è rendere attenti sull'importanza del dimensionamento dei cavi per ridurre le perdite e per sopportare le maggiori correnti e inoltre di scegliere utilizzatori adatti alla tensione continua del sistema.

Figura 75: Impianto Stand alone 12V DC, con regolatori di carica (postazione 2)



Impianto “Stand alone” con tensione di sistema 230V AC

Questo stand mostra un impianto di potenza medio-piccola costituito da un ondatore 12V DC - 230V AC non collegato alla rete con regolatore di carica incluso. Anche in questo caso sono stati montati due tipi differenti di ondulatori ; uno di vecchia concezione con forma d'onda d'uscita quadrata e uno con forma d'onda d'uscita sinusoidale. Tramite dei commutatori è possibile selezionare e utilizzare o l'uno o l'altro di questi due ondulatori. Viene posta particolare attenzione alla compatibilità dei vari utilizzatori in funzione della differente forma d'onda d'uscita dei due tipi di ondatore. Si vuole anche mostrare come alcuni utilizzatori necessitano, all'accensione, di forti spunti di corrente (vedi per es. frigoriferi) e quindi di come alcuni ondulatori sono più o meno adatti per quale utilizzatore e viceversa.

Figura 76: Impianto stand alone 230V AC, con ondulatori DC/AC (postazione 3).



Impianto “Stand alone” di grossa potenza ($U_{out} = 230V AC 1Ph$)

Questo stand di grossa potenza (200-1000W di moduli PV) è costituito da un ondatore dell'ultima generazione che permette l'impiego di utilizzatori di grande potenza (es. trapani, aspira polveri, frigoriferi, ecc.). La tensione d'uscita del sistema è di 230 VAC sinusoidale. Questo ondatore permette pure il collegamento in entrata di un generatore ausiliario per eventualmente compensare una non sufficiente produzione di corrente da parte dei moduli fotovoltaici collegati ad esso. Spesso un impianto di questo tipo è alimentato da un generatore di emergenza a combustibile fossile. Viste le dimensioni dell'impianto stesso è consigliabile un sistema di sicurezza con collegamento rispetto a terra. In questo caso vengono trattati solamente i sistemi di sicurezza concernenti la parte DC dei moduli fotovoltaici (es. scaricatori di tensione, fusibili, ecc..). I sistemi di sicurezza della parte corrente alternata AC dovrebbero essere lasciati alla competenza delle maestranze degli elettricisti.

Figura 77: Impianto stand alone di potenza 230V AC, con ondatore DC/AC (postazione 4)

5.6 Statistica cantonale degli impianti PV allacciati alla rete.

Dal 1998 il LEEE-TISO si occupa di redigere una statistica sul funzionamento degli impianti PV collegati alla rete in Canton Ticino, al fine di paragonare i principali dati di funzionamento ed individuare anomalie e/o guasti. Ogni anno, nel mese di dicembre viene richiesta, ai proprietari o ai responsabili degli impianti, la produzione annuale (lettura del contatore dell'impianto); a partire da giugno 2002 si è deciso di effettuare una verifica intermedia per avere un miglior controllo ed, eventualmente, un più rapido intervento in caso di malfunzionamenti.

Attualmente la statistica comprende 32 impianti, le cui caratteristiche sono indicate nella Tabella 19, per una potenza totale installata pari a 472.12 kWp. Da segnalare, non ancora inseriti nella tabella, la presenza di 24 nuovi impianti messi in funzione nel corso degli ultimi mesi. Ciò è da attribuirsi all'assegnazione da parte del Cantone di sussidi per la promozione di impianti fotovoltaici allacciati alla rete (Decreto Esecutivo del 3 luglio 2002); le richieste accettate sono state 43 ed il credito a disposizione (CHF. 1'312'000.--) si è esaurito velocemente.

Dai dati raccolti nei diversi anni risulta che la principale causa di guasti ed anomalie nel funzionamento degli impianti è l'ondulatore, mentre, fin'ora, non sono stati segnalati problemi ai moduli. Considerando che la vita media di un ondulatore è di 9-10 anni, e che molti impianti hanno raggiunto o superato i 9 anni di vita, risulta fondamentale, per tali impianti, un miglior controllo.

Nel corso degli ultimi 3 anni, il LEEE-TISO si è occupato della sostituzione dell'ondulatore di 5 impianti che attualmente funzionano correttamente. Inoltre, nel 2001, nell'ambito di un altro progetto di ricerca il LEEE-TISO ha eseguito il risanamento dell'impianto di 103.7 kW di Riazzino (MARK II ora AETIII); in particolare, è stato sostituito l'ondulatore – guasto – con 3 ondulatori da 30kW. A seguito del risanamento il laboratorio analizzerà accuratamente, per 3 anni, il comportamento dell'impianto tramite un monitoraggio dettagliato e misure annuali puntuali.

Impianto, luogo	Caratteristiche impianto				Caratteristiche moduli				Messa in funzione
	Potenza [kW]	N° mod.	Incl. (°)	Orient. (° sud)	Potenza [W]	Fabbricante	Tipo	Cella	
TISO 10 kW, Canobbio	9.32	252	55	-6	37	Arco Solar	ASI162300	sc-Si	05.82
TISO 4 kW, Canobbio	2.88	96	55	-6	30	Arco Solar	G4000	a-Si	05.88
Privato, Locarno	2.14	39	45	0	55	Siemens	M55	sc-Si	1988
Privato, Brione s. Minusio	2.16	36	45	0	60	Solarex	MSX60	mc-Si	1988
UBS, Lugano	2.88	60	30	20	48	Kyocera	LA361J48	mc-Si	1990
UBS, Ascona	2.88	60			48	Kyocera	LA361J48	mc-Si	1990
AET II (FFS), Giubiasco	22.00	220	30	-42	100	Helios	H100F	sc-Si	01.92
SES, Locarno	3.18	60	30	0	53	Siemens	M55	sc-Si	01.92
Privato, Brissago	3.00	60	38	45	48	Kyocera	LA361J48	mc-Si	02.92
AET I, Monte Carasso	3.18	60	50	-5	53	Siemens	M55	sc-Si	02.92
OFIMA, Locarno	3.18	60	40	0	53	Siemens	M55	sc-Si	02.92
Scuole Semine, Bellinzona	3.08	56	40	0	55	Siemens	M55	sc-Si	08.92
AET III, Riazzino	103.70	864	45	15	120	Solarex	MSX120Q	mc-Si	11.92
Scuole comunali, Canobbio	3.18	60	50	0	53	Siemens	M55	sc-Si	11.93
Scuole comunali, Morbio Inf.	3.18	60	50	-20	53	Siemens	M55	sc-Si	12.93
Casa comunale, Lavertezzo	3.18	60	50	9	53	Siemens	M55	sc-Si	04.94
Scuole comunali, Locarno	3.18	60	50	-5	53	Siemens	M55	sc-Si	05.94
Municipio, Morbio Sup.	3.18	60	20	-20	53	Siemens	M55	sc-Si	09.94
Scuole comunali, Losone	3.18	60	50	0	53	Siemens	M55	sc-Si	09.94
Casa comunale, Giubiasco	3.18	60	29	40	53	Siemens	M55	sc-Si	09.94
Scuole comunali, Magliaso	1.86	16	90	0	116	Siemens	S116	sc-Si	11.95
Centro Tecnico Giubiasco	21.00	280	20	30	75	Siemens	M75S	sc-Si	06.96
Privato, Monte Carasso	3.96	72	45	0	55	Siemens	M55	sc-Si	01.97
Privato, Gravesano	1.10	20	40	15	55	Siemens	M55	sc-Si	04.97
UBS – tetto est, Suglio	50.83	598	20	35	85	BP Solar	585L Sat.	sc-Si	07.97
	23.40	78	4		300		BP300	sc-Si	07.97
UBS – tetto ovest, Suglio	50.83	598	20	35	85	BP Solar	585L Sat.	sc-Si	07.97
	23.40	78	4		300		BP300	sc-Si	07.97
UBS – facc. est, Suglio	20.16	144	90	35	140	Sharp	NT0D170	sc-Si	07.97
UBS – facc. ovest, Suglio	15.40	110	90	35	140	Sharp	NT0D170	sc-Si	07.97
Gastro Ticino, Lugano	3.80	42		0	90.2	Siemens	Laminati	sc-Si	01.98
TISO 0.5 kW, Canobbio	0.50	8	55	-6	62	Canon		a-Si	07.98
Privato, Canobbio	2.54	42	15		60	Kyocera	KC60	mc-Si	12.99
Conimba, Mendrisio	1.10	10			110	Shell	IRS 110	sc-Si	07.00
Privato, Caslano	4.95	45	7.5	60	110	Siemens	SM110L	sc-Si	10.00
Privato, Cassarate	2.20	20			110	Siemens	SM110	sc-Si	01.01
Privato, Tegna	4.40	40			110	Siemens	M110	sc-Si	07.01
Privato, Arosio	0.85	10	30	25	85	BP Solar	BP585	sc-Si	05.03

Tabella 19: impianti PV collegati alla rete in Cantone Ticino e loro caratteristiche.

5.7 Conclusione

Impianto TISO 10kW sc-Si:

- Giunto quasi al suo 22-esimo anno di vita, l'impianto è ancora operativo.
- Malgrado le numerose tracce di degrado meccanico ed il persistente aumento delle infiltrazioni, i moduli funzionano ancora correttamente. L'ondulatore invece, dopo soli 12 anni di esercizio, ha dovuto essere sostituito con 3 string-inverter.
- Nonostante interruzioni dovute a misure particolari, l'età dell'impianto, la sua inclinazione non ottimale e l'ondulatore sovradimensionato, nel 2000 l'indice di produzione ha superato la media svizzera.
- La stabilità di questi moduli è confermata anche dalle misure @STC sui 18 moduli di riferimento. La loro potenza media (tralasciando i 3 moduli più instabili) è ancora di 33.9W e, rispetto a quella misurata nel 1982, è diminuita soltanto del 4.2% (-8.1% rispetto al valore nominale fornito dal fabbricante). Questa differenza di potenza è inferiore a quella di parecchi moduli di fabbricazione recente, che @STC non rispettano neppure i limiti di garanzia già al momento dell'acquisto.
- Questa diminuzione di potenza corrisponde ad un degrado medio dello 0.2% all'anno.
- Negli ultimi 3 anni l'impianto è stato analizzato con particolare interesse: in collaborazione col JRC di Ispra è stato svolto uno studio volto a determinare il “Mean Time Before Failure (MTBF)”

Impianto TISO 4kW a-Si:

- I moduli a-Si single-junction della prima generazione, di più di 15 anni fa, avevano subito durante i primi mesi di funzionamento, un degrado del 25% rispetto al rendimento d'esercizio iniziale. Nei successivi 15 anni si è avuto un ulteriore degrado, mediamente del 10%-15%, corrispondente ad un degrado annuale di ca. 0.7%.
- L'impianto è ancora in funzione dopo 16 anni di esposizione.
- I cicli di degrado e rigenerazione continuano con la stessa ampiezza degli anni precedenti.
- Negli ultimi anni si nota una diminuzione generale del degrado.
- La serie no. 1 (di riferimento) è rimasta abbastanza stabile negli ultimi due anni, e ora si situa allo stesso livello delle altre migliori serie.
- La serie no. 7, completamente isolata termicamente nel 1998, mostra un miglioramento di rendimento d'esercizio dal 6% al 12%. L'instabilità e le variazioni da modulo a modulo rendono arduo il confronto.
- L'isolazione termica ed il conseguente aumento di temperatura, non arresta il degrado generale dei moduli. Infatti pure la serie no. 7 presenta una diminuzione del suo rendimento d'esercizio.

Impianto TISO 0.5 kW a-Si triple-junction:

- L'impianto TISO 0.5 kW è in funzione da quasi 6 anni.
- Contrariamente all'impianto a-Si con moduli della vecchia generazione, il suo rendimento d'esercizio è stabile, e oscilla tra il 6 e il 6.8%.

Impianti TISO ad uso didattico:

- Utilizzando i moduli che hanno terminato le prove, sono stati realizzati alcuni piccoli impianti ad uso didattico, sia autonomi che collegati alla rete.

Impianti PV allacciati alla rete in Ticino:

- La statistica comprende attualmente 32 impianti, per una potenza totale 472.12 kWp. Gli impianti realizzati nell'ambito dei sussidi cantonali non sono ancora stati inseriti.
- Dai dati finora raccolti risulta che la principale causa di guasti ed anomalie è l'ondulatore. Nel corso degli ultimi 3 anni, il LEEE ha dovuto sostituire l'ondulatore di 5 impianti.
- Nel 2001 il LEEE-TISO si è occupato del risanamento dell'impianto da 103.7 kW di Riazzino, rispettivamente del suo monitoraggio dettagliato, tuttora in corso.

6 DIVULGAZIONE DELLE INFORMAZIONI E FORMAZIONE

6.1 Abstract (in English)

Various activities mentioned in this section are not in the present research project. Nevertheless, they are fundamental for the divulgation of knowledge about solar energy, the results obtained and the public image of the laboratory. It is therefore opportune to provide an albeit brief description of these activities.

- For three and a half years, the LEEE has published a six-monthly newsletter (LEEE news); the publication, which is in English, has reached its 7th edition.
- The regularly updated laboratory website (www.lee.ee.supsi.ch) contains the publications, the results of measurements, a summary of the main activities and test inspections, the latest news and the principle links in this field.
- On the 16-17 May the National Photovoltaic Symposium took place in Trevano, coinciding with the 20th anniversary celebrations of the TISO 10kW, the first plant in Europe to be grid-connected. The event, which was organised in conjunction with UFE, SWISSOLAR and AES, met with great success (more than 200 participants) and enabled the laboratory to make its activities better known, both at a local and Swiss level.
- As part of the SUPSI's Continuous Training programmes, two courses on photovoltaics were organised, one in 2000 and one in 2003. The first, which was aimed at electricians and planners, attracted numerous participants also from Italy. The second was revised and aimed at architects.
- In 2002, at the SPAI Mendrisio, TISO held a photovoltaics course for 30 electrical fitters who are working towards the EPS (esame professionale superiore) in order to obtain the federal diploma of master electrician: the course contents will be a subject for examination.
- The Arché Italia association organised a course in Como in 2003, called 'Corso di progettazione ecologica'; TISO was invited to give a module to 53 architects called 'Produrre energia con il sole, il PV nell'edificio ecologico' (Producing Energy with the Sun; PV in ecological buildings).
- Since 2002, TISO has participated in the technical days for girls, events organised annually by the SUPSI. In its workshop, the various methods for exploiting solar energy in buildings are presented.
- In 2001, TISO held a 4-day course in Rome, organised by RomaEnergia, which included the practical setting up of some grid-connected plants. The course was attended by 47 planners and fitters.
- In 2003, at the Scuola Media di Canobbio, a 1kW PV plant was linked to the grid, in close collaboration with fourth year students doing the electricity course. TISO supplied the technical knowhow, while the course was financed by the Canton and Greenpeace.
- In 2003 TISO prepared a similar ongoing educational project, aimed at the 5 cantonal high schools, and financed by Greenpeace, BUWAL and the Canton. In some schools the project will be presented as one of the options for the maturity paper students are required to write, whereas in others it will be inserted into the normal school programmes.

6.2 Introduzione

Le attività di divulgazione delle informazioni e dei risultati della ricerca non rientrano tutte nel presente progetto “Centrale di collaudo LEEE-TISO” ma fanno parte delle attività generali del LEEE.

Le attività di divulgazione dei risultati di questa ricerca sono effettuate essenzialmente attraverso quattro canali:

1. Le pubblicazioni scientifiche (vedi capitolo 9).
2. Le pubblicazioni informative (vedi capitolo 10).
3. Internet (tramite la pagina del LEEE <http://www.lee.e.supsi.ch>)
4. Il foglio informativo “LEEE News”

Le scuole SUP (“Fachhochschule”) hanno, oltre al mandato di ricerca – sviluppo – transfer (RST), i due mandati di formazione di base e continua. Essi non fanno parte del presente progetto. Tuttavia nel seguente capitolo sono mostrati alcuni corsi di formazione continua indirizzati a più livelli formativi.

Durante il corso del progetto nel 2002, per sottolineare i 20 anni di attività del gruppo TISO, si è svolto il 4° Simposio Nazionale Fotovoltaico. Più di 200 persone hanno partecipato alle conferenze sull’arco di due giorni.

6.3 LEEE homepage

La homepage del LEEE ha una nuovo indirizzo:

www.lee.e.supsi.ch

La pagina iniziale è stata modificata (vedi Figura 78) in modo da mettere in risalto i 2 gruppi del laboratorio (TISO e UREC) e mostrarne l’ubicazione all’interno del centro studi di Trevano.

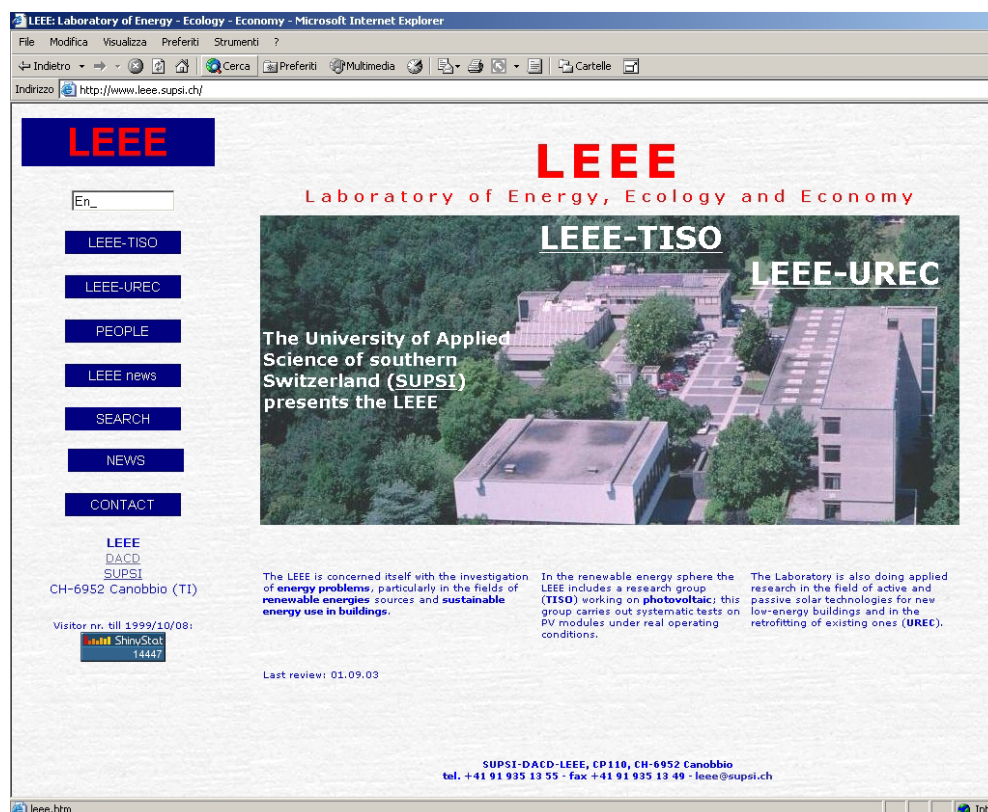


Figura 78: Pagina iniziale sito LEEE

Nella homepage del LEEE, oltre ad una descrizione del laboratorio vengono pubblicati i risultati delle misure, il riassunto delle principali attività e dei collaudi, le novità e i principali link del settore.

Il sito web è stato aggiornato regolarmente con l’inserimento principalmente delle pubblicazioni (rapporti annuali, rapporti finali, articoli presentati alle conferenze, LEEE news, ecc.) del LEEE-TISO.

6.4 LEEE-News

Le attività del LEEE e altre informazioni sull'energia in genere vengono, da dicembre 2000, pubblicate semestralmente in una newsletter (LEEE news); la pubblicazione viene fatta unicamente in inglese per permetterne la lettura da parte di un maggior numero di persone.

Il LEEE news (nel formato di un foglio A3 piegato) è suddiviso nei seguenti argomenti:

Editorial: Editoriale con il riassunto del LEEE news e novità
 LEEE activities: Attività del LEEE nell'ecologia (ARIA, RNI, ecc.)
 TISO activities: Attività del LEEE nel fotovoltaico
 UREC activities: Attività del LEEE nel utilizzo razionale dell'energia nella costruzione
 News: Novità nel settore delle energie rinnovabili (principalmente PV)
 Terminology: Spiegazione di termini utilizzati nel settore energie rinnovabili
 LEEE team: Presentazione dei collaboratori del LEEE
 Calendar: Calendario delle principali manifestazioni internazionali, nazionali e presso il LEEE
 Good links: Indirizzi Internet sulle energie rinnovabili
 Smart applications: Presentazione di applicazioni innovative nel settore delle energie rinnovabili

Questo documento, giunto al numero 7, redatto in un linguaggio semplice e indirizzato all'utente finale (professionisti e consumatori) ha riscosso un notevole interesse.

Il “LEEE news” viene distribuito sia in forma cartacea (300 indirizzi) che in formato elettronico (400 e-mail con “LEEE news” allegato in pdf).

Il layout inizialmente più informale è stato modificato nel corso del 2002 in modo da essere più confacente alle disposizioni della SUPSI riguardanti le pubblicazioni.

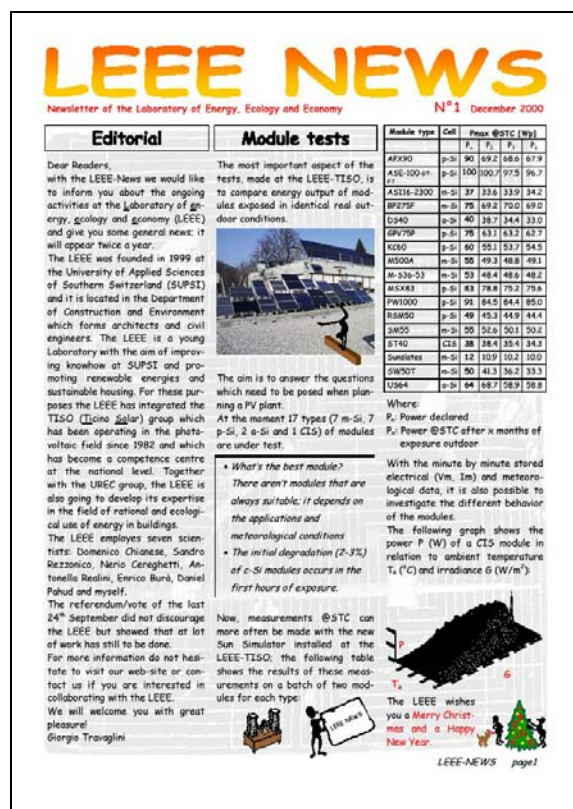


Figura 79: i due diversi layout del “LEEE news”

6.5 Simposio Nazionale fotovoltaico 2002

Il 16-17 maggio 2002 si è svolto a Trevano -per la prima volta in Ticino- il Simposio Fotovoltaico Nazionale, in particolare per festeggiare i 20 anni di vita del primo impianto d'Europa collegato alla rete elettrica, precisamente il 13 maggio 1982: il TISO 10kWp. In questo contesto in LEEE ha presentato una retrospettiva delle prime attività fotovoltaiche in Svizzera.

Nel corso del simposio, promosso con il motto “20 anni di fotovoltaico in Svizzera: passato-presente-avvenire”, sono stati sviluppati principalmente i temi seguenti:

- Il mercato dell'elettricità solare e il suo contesto
- Tecnologie fotovoltaiche: passato, presente, futuro
- Nuovi mercati: prospettive per l'industria

Uno degli scopi principali del simposio nazionale era quello di indicare quali sono le nuove opportunità per il settore, sia nel nostro paese che all'estero. Tra queste vi sono certamente la domanda crescente di elettricità ecologica e i promettenti concetti e prodotti sviluppati dalla ricerca svizzera. Di sicuro interesse sono state anche le informazioni sui programmi promozionali in vigore nei paesi confinanti e sulle applicazioni del fotovoltaico nei paesi in via di sviluppo. Questo ha permesso di gettare uno sguardo più approfondito sulla possibile evoluzione dell'uso di energie rinnovabili nella “Sonnenstube” della Svizzera.

Il simposio si è tenuto sotto la conduzione di esperti provenienti dal nostro paese e dall'estero. Tra gli altri, figuravano fra i relatori personalità quali il Consigliere di Stato Marco Borradori, il direttore dell'Ufficio federale dell'energia Dr. Walter Steinmann e il Direttore generale del Ministero dell'ambiente italiano Giovanni Silvestrini. La manifestazione è stata organizzata congiuntamente dall'Ufficio federale dell'energia, da SWISSOLAR e dall'Associazione delle aziende elettriche svizzere (AES).

L'offerta d'informazioni del simposio è stata completata da una visita al centro TISO e da una vasta esposizione di posters e prodotti, tenutasi in parallelo nella hall della SUPSI, per illustrare gli ultimi sviluppi della tecnica in campo fotovoltaico.

La manifestazione ha riscontrato notevole successo e ha permesso di far conoscere ulteriormente le attività del laboratorio sia ai progettisti che alla popolazione locale, con innumerevoli articoli su riviste e giornali, e presenze alla radio e alla televisione. Ecco alcune cifre:

- n° di partecipanti: più di 200
- n° di presentazioni: 25
- n° di espositori: 30
- n° di posters: 40

Importanza della manifestazione a livello cantonale:

Il periodo in cui è caduta la manifestazione non poteva essere più propizio nell'ottica della sensibilizzazione e della promozione delle energie rinnovabili in Ticino.

Infatti, nei primi mesi del 2002, il Gran Consiglio ha dato una chiara dimostrazione di volontà politica, approvando il nuovo decreto energetico dell'edilizia dove vengono specificate le norme di riferimento per ottenere dalle nuove costruzioni uno standard edilizio che permetta un utilizzo più razionale dell'energia. Nello stesso periodo il DACD della SUPSI, presentava una serie di 15 corsi di formazione specifici nel settore dell'energia. Lo scopo era quello di fare in modo che concetti come il fotovoltaico, il solare termico, la geotermia come pure le differenti opportunità di sfruttamento della legna vengano sempre più adeguatamente considerati dai committenti, dai progettisti e dagli installatori.

Il simposio nazionale ha quindi costituito per la scuola un'occasione per profilarsi sul territorio e per evidenziare le sue potenzialità di scuola dinamica e moderna, inserita nel contesto universitario delle 7 SUP Svizzere.

Ci si auspica che questa iniziativa abbia contribuito a diffondere sul territorio ticinese una migliore cultura del risparmio energetico e dell'utilizzo di energie alternative per fare così in modo che il nuovo decreto costituisca effettivamente una svolta, che ci permetta di allinearci con i migliori cantoni svizzeri.



Figura 80: Simposio Nazionale fotovoltaico 2002, alcuni momenti durante le presentazioni.



Figura 81: Simposio Nazionale fotovoltaico 2002: i fondatori del progetto in visita all'impianto.



Figura 82: Simposio Nazionale fotovoltaico 2002, stand di un espositore



Figura 83: Simposio Nazionale fotovoltaico 2002, discussioni e visita all'esposizione di posters. Visita del Consigliere di Stato On. Marco Borradori.

6.6 Corsi di formazione

Corsi di formazione continua

Nel **2000** il LEEE ha nuovamente impartito il corso di formazione continua della SUPSI “Tecnica fotovoltaica DCT 3.01”, che si suddivideva in 3 moduli da 8 ore-lezione ciascuno:

- introduzione teorica: acquisizione delle conoscenze di base relative al fotovoltaico
- approfondimento con simulazione al computer (impianti autonomi e collegati alla rete)
- progettazione e assemblaggio di impianti autonomi

La novità, rispetto ai corsi precedenti, consisteva nell'aggiunta dell'ultimo modulo sugli impianti autonomi. Per l'occasione sono stati allestiti alcuni stands (vedi Figura 84), dove i partecipanti hanno avuto modo di costruire fisicamente un impianto autonomo semplice e verificarne il funzionamento.

Il corso, che era rivolto agli operatori del settore -in particolare a ingegneri, architetti progettisti e consulenti (parte 1 e 2) e a elettricisti e montatori (parte 3)- ha attirato numerosi professionisti anche dall'Italia, e globalmente ha avuto un buon successo; i partecipanti ad ogni modulo sono stati una ventina.



Figura 84: Corsisti alle prese con la parte pratica

Nel **2001** non è stato possibile realizzare il corso per insufficienza d' iscritti. Nel **2002** il LEEE, consapevole che il bacino di potenziali interessati è ormai in via di esaurimento e sulla base delle esperienze dei corsi precedenti, ha rielaborato il programma e rivolto il corso ad un altro tipo di pubblico: gli architetti.

Dopo una pausa relativamente lunga, nel **2003** il LEEE ha quindi riproposto il corso DCT 094 “Architettura ed energia solare: il binomio del futuro!”, rivolto appunto agli architetti; in particolare il corso è stato alleggerito (8 h) e arricchito con numerosi interventi di relatori esterni. Questa nuova formula ha ridestato l'interesse di 24 iscritti.

Corso SPAI

Nel corso del 2002 (ottobre 2002-gennaio 2003) il LEEE ha tenuto, presso la SPAI (Scuola Professionale Artigianale e Industriale) di Mendrisio, un corso sul fotovoltaico di 4 lezioni.

La particolarità del corso consiste nel fatto che era rivolto ad una trentina di montatori elettricisti che si stanno preparando per l'esame professionale superiore (EPS): i candidati che supereranno l'esame scritto, che si terrà nel 2004, conseguiranno un diploma federale (maestro elettricista).

Anche il fotovoltaico rientra in una serie di conoscenze di carattere generale che gli studenti devono possedere: il corso impartito è pertanto materia d'esame. Esso si inserisce nel gruppo tecnico GT II-2 “Sistemi di energia addizionali, impianti di produzione di energia”, dove vengono trattati temi quali appunto gli impianti fotovoltaici, l'energia eolica, le cellule a combustione, le piccole centrali idriche, gli impianti AFC (accoppiamento forza calore) e l'energia geotermica.

Un collaboratore del TISO dovrà ancora mettersi a disposizione per:

- rispondere alle domande dei candidati
- preparare le domande d'esame relative al corso impartito. L'intenzione è di porre domande interdisciplinari su un progetto concreto (da mettere a punto in collaborazione con gli altri docenti) dove intervengono tutti gli aspetti trattati all'interno del gruppo tecnico in questione.
- essere presente durante gli esami
- correggere gli esami; in seguito una commissione neutra li ricontrollerà
- dare una valutazione finale ad ogni candidato

Corso di progettazione ecologica

L'associazione Arché Italia ha organizzato a Como, nel 2003, un “Corso di progettazione ecologica”, della durata di 40 ore, aperto a professionisti, e finalizzato all'acquisizione degli strumenti necessari per una corretta progettazione ecologica e bioclimatica.

Il corso poneva l'accento sull'importanza della questione ecologica nelle costruzioni affrontando temi quali inquinamento indoor, progettazione di edifici bio-ecologici, sostenibilità urbana e territoriale, valorizzazione delle risorse ambientali locali e utilizzo responsabile dell'energia. Era suddiviso in 10 lezioni (moduli) da 4 ore ciascuna che si sono svolte presso la sede dell'Ordine degli Architetti di Como.

Il TISO è stato chiamato ad impartire la quinta lezione, dal titolo “Produrre energia con il sole, il fotovoltaico nell'edificio ecologico”. I partecipanti sono stati 53, in prevalenza architetti.

Giornate tecniche per ragazze

Dal 2002 il LEEE-TISO partecipa attivamente alle giornate tecniche per ragazze, organizzate annualmente dalla commissione Gender della SUPSI, e rivolte a ragazze delle scuole medie. Le giornate si svolgono su due giorni e coinvolgono mediamente una trentina di ragazze. I genitori hanno la possibilità di raggiungere le ragazze a scuola.

Alle ragazze viene chiesto di immaginare di costruire la casa dei propri sogni; passo dopo passo procedono con il progetto, visitando diversi ateliers quali ad esempio quello di pianificazione del territorio, quello di energia, di architettura, di ingegneria civile, di geotecnica, di topografia, eccetera.

Nell'atelier di energia, allestito dal LEEE, si spiega alla ragazze come la luce e il calore solare giocano spesso un ruolo determinante nella progettazione di un edificio. La ricerca della migliore insolazione influenza in modo importante la forma generale dell'edificio, la disposizione delle stanze, la dimensione e posizione delle finestre, la presenza di portici, terrazze, ecc. Oltre ad illuminare e a rendere più piacevole l'interno, il sole può rappresentare per l'edificio una fonte energetica non trascurabile. Vengono trattati, in particolare con l'ausilio di numerosi esperimenti, il solare passivo, attivo, e il fotovoltaico.

Corso Romaenergia

Si vuole riportare lo svolgimento di un corso di formazione tenuto dai collaboratori del LEEE-TISO a Roma nel dicembre 2001, organizzato da RomaEnergia (Agenzia per il risparmio energetico e lo sviluppo sostenibile di Roma) in concomitanza con l'introduzione dei bandi di concorso della regione Lazio nell'ambito del programma Italiano “10'000 tetti fotovoltaici”.

Il corso, che si è svolto sull'arco di 4 giorni (8-11.12.01), è stato strutturato in 4 moduli, in modo da raggiungere due tipi di pubblico: i progettisti e gli installatori.

Con il primo modulo (“1-Introduzione teorica”) si acquisivano le conoscenze tecnico-economiche di base relative al fotovoltaico, con il secondo modulo invece (“2-Progettazione e assemblaggio di impianti in rete”) le competenze richieste per progettare e realizzare impianti fotovoltaici collegati alla rete. Il terzo modulo (“3A-Esercitazione pratica”) consisteva nella realizzazione pratica di alcuni impianti collegati alla rete e il quarto (“3B-Approfondimento con simulazione al computer”) nella progettazione al computer.

Al corso hanno partecipato complessivamente 47 persone, delle quali:

- 23 hanno seguito il corso per progettisti (20 ore di lezione, modulo 1, 2, 3B)
- 8 hanno seguito il corso per installatori (16 ore di lezione, modulo 1, 2, 3A)
- 16 hanno seguito entrambi i corsi (24 ore di lezione, modulo 1, 2, 3A e 3B)

Alla fine dei corsi il LEEE-TISO ha rilasciato a tutti i partecipanti un attestato di frequenza.



Figura 85: Alcune immagini del corso a tenuto Roma nel 2001

6.7 La banca dati dei moduli

Nell'ambito dei progetti precedenti è stata messa a punto una banca dati su supporto informatico, che raccoglie tutti i dati caratteristici dei moduli presenti sul mercato forniti dai fabbricanti.

Nel corso del 2002 è avvenuto l'ultimo aggiornamento che ha permesso di rilevare che il numero di ditte produttrici di moduli fotovoltaici è in continua espansione come pure la gamma dei prodotti; per il momento non sono previsti ulteriori aggiornamenti.

6.8 Divulgazione del fotovoltaico nelle scuole

Impianto fotovoltaico presso la Scuola Media di Canobbio:

Presso la Scuola Media di Canobbio nel 2003 è stato realizzato un impianto fotovoltaico da 1kW collegato alla rete.

Il LEEE-TISO ha fornito il supporto tecnico necessario, occupandosi in particolare di aspetti quali la ricerca del finanziamento, il progetto di massima, lo studio di varianti e la messa a punto di alcuni kits vantaggiosi, la progettazione dettagliata, le simulazioni al computer, e la comanda del materiale.

Il “kit PV completo” elaborato e proposto dal LEEE, ha permesso di semplificare la comanda (in blocco, vedi anche progetto “PV nei licei” più sotto) e il montaggio, rispettivamente ha permesso di proporre il fotovoltaico ad un prezzo interessante. Nell’allestire il kit sono stati curati alcuni aspetti che dovranno garantire un adeguato utilizzo didattico dell’impianto.

L’impianto è infatti munito di un sistema d’acquisizione dati che permette di memorizzare automaticamente su un PC i principali dati di funzionamento e „mostrarli“, in tempo reale, allo schermo e su un display esterno. Questa componente dell’impianto è fondamentale: d’un lato è indispensabile (visualizzazione dati) per rendere attenti e sensibilizzare allievi e docenti, anche di altre discipline, dall’altro permette un continuo monitoraggio dell’impianto (memorizzazione dati) per verificarne il buon funzionamento.

La tipologia modulare permette inoltre un facile ampliamento futuro dell’impianto, anche se, per gli scopi didattici prefissati, una potenza di 1kW è sufficiente e permette allo stesso tempo di mantenere i costi contenuti.

Modulo fotovoltaico:	
Fabbricante:	RWE/ASE
Tipo:	ASE-100-GT-FT
Tecnologia celle:	Silicio monocristallino
N°celle per modulo:	72
Potenza massima Pm:	100 W
Im / Vm:	2.9 A / 34.5 V
Dimensioni:	1282 x 644 x 35 mm
Massa:	8.5 kg
Ondulatore:	
Fabbricante:	SMA
Tipo:	Sunny Boy SWR 850
Potenza nominale Pac:	850 W
Cablaggio:	
N° moduli per serie:	5
N° di serie in parallelo:	2
Impianto:	
Potenza massima totale:	1 kW
Tipo impianto:	Collegato alla rete
Tipologia:	String inverter
Ancoraggio:	Gravitazionale
N° moduli:	10
Inclinazione / azimut:	25° / 33° ovest
Lunghezza:	12.82 m
Superficie attiva:	8.26 m ²
Monitoraggio:	
Acquisizione dati:	SB Control Light+PC
Visualizzazione dati:	Display esterno
Energia elettrica:	
Produzione attesa:	892.1 kWh/a
Indice di produzione Yf:	892.1 kWh/kWp
Performance Ratio PR:	79%



Figura 86: Descrizione impianto PV SM Canobbio (kit PV)

Figura 87: Montaggio impianto SM Canobbio

L'impianto è stato realizzato con la stretta collaborazione degli allievi di quarta media, nell'ambito del corso opzionale di elettricità. Parallelamente al montaggio, al cablaggio e alla messa in servizio dell'impianto, gli allievi sono stati coinvolti in un ricca attività didattica:

- attività in classe: il tema è stato trattato in classe, con schede di teoria ed esercizi
- attività all'esterno: gli allievi hanno effettuato misurazioni sui moduli
- attività correlate: sono state effettuate visite ad impianti già esistenti e studiate altre applicazioni del fotovoltaico (ad es. produzione di idrogeno, modellino auto con cella a combustibile,...)



Visto che questo tema è stato inserito nel normale programma di studio del corso di elettricità, anche gli allievi dei prossimi anni potranno usufruire dell'impianto PV per approfondire le conoscenze (misurazioni, ecc).

Figura 88: Allievi SM Canobbio, attività didattiche

I lavori sono iniziati in gennaio 2003 e sono stati ultimati in maggio 2003. L'impianto è in funzione dal 28.05.03; nel corso del 2003, in 7 mesi di attività, ha erogato 620 kWh, più del previsto.

Il progetto, costato complessivamente 12'000 Fr, è stato finanziato interamente dal Cantone (Ufficio Risparmio Energetico, Dipartimento del Territorio) e da Greenpeace Svizzera (JugendSolarProjekt).

L'importanza di questo progetto consiste nel fatto che si tratta del primo impianto in Ticino realizzato dagli allievi stessi presso una Scuola Media; inoltre ha svolto il ruolo trainante di impianto pilota diventando la base di partenza per la realizzazione di altri impianti in tutti i licei del Cantone.

Il progetto ha permesso di divulgare il PV e le conoscenze del TISO in un altro ordine scolastico, ha favorito la collaborazione con i docenti e ha permesso di formare e sensibilizzare i giovani.

Progetto "PV nei licei":

Sulla base delle esperienze acquisite con l'impianto sulla Scuola Media di Canobbio, nel corso del 2003 il LEEE-TISO ha allestito un progetto didattico analogo, ma più completo e rivolto alle scuole medie superiori del Canton Ticino.

Più precisamente si sta realizzando un impianto PV da 1kW collegato alla rete (indentico a quello già montato sulla la Scuola Media di Canobbio) presso ogni liceo del Cantone Ticino, tranne nella sede di Locarno, dove l'impianto è già stato installato dall'azienda elettrica locale (questa scuola sarà interessata sola dalla parte didattica). Gli obiettivi principali del progetto sono i seguenti:

1) Realizzazione:

Progettazione, montaggio e messa in servizio degli impianti, compreso l'acquisizione e la visualizzazione dati.

2) Informazione:

Informazione del grande pubblico con conferenza stampa e porte aperte; serate informative, seminari ed interventi vari del LEEE presso le varie sedi; allestimento di una documentazione tecnica semplice comprensibile da tutti.

Figura 89: Una lezione sul PV presso il Liceo di Bellinzona.

3) Formazione:

Formazione dei docenti e allestimento di una documentazione tecnica dettagliata in modo che questo argomento possa essere ripreso anche negli anni seguenti; formazione degli allievi sulla tematica del PV e sensibilizzazione su altri aspetti ambientali quali ad es. sviluppo sostenibile, fabbisogno energetico e fonti di energia rinnovabili in genere. Gli studenti saranno anche coinvolti nel monitoraggio e nello studio del comportamento degli impianti.

In alcune sedi il progetto verrà presentato come lavoro di maturità e verrà di conseguenza valutato. In altre verrà inserito nel normale programma di insegnamento.



Il LEEE fornirà il supporto tecnico necessario, coordinerà i lavori e collaborerà attivamente con i docenti e gli allievi liceali. Al termine, i lavori realizzati dagli studenti saranno selezionati, catalogati secondo il loro contenuto tecnico e pedagogico e pubblicati in un rapporto che potrà essere utilizzato per introdurre il tema in altre scuole.

La durata del progetto, iniziato in gennaio 2004, è di 2 anni. Il finanziamento è assicurato dal Cantone Ticino, da Greenpeace e dal BUWAL.

6.9 Conclusione

Diversi lavori riportati in questo capitolo non sono compresi nel presente progetto di ricerca. Tuttavia queste attività sono fondamentali per la divulgazione verso l'esterno delle conoscenze, dei risultati ottenuti, e dell'immagine del laboratorio più generalmente, si è quindi ritenuto opportuno farne una descrizione, anche se succinta.

- Da tre anni e mezzo il LEEE pubblica semestralmente le sue attività in una newsletter (LEEE news); la pubblicazione, fatta unicamente in inglese, è giunta al numero 7.
- Sul sito del laboratorio (www.lee.e.supsi.ch), regolarmente aggiornato, sono reperibili in particolare le pubblicazioni, i risultati delle misure, il riassunto delle principali attività e dei collaudi, le novità e i principali link del settore.
- Nel 2002, la banca dati su supporto informatico dei moduli presenti sul mercato è stata nuovamente aggiornata.
- Il 16-17 maggio 2002 si è svolto a Trevano il Simposio Fotovoltaico Nazionale, in concomitanza con i festeggiamenti dei 20 anni di vita del TISO 10kW, il primo impianto d'Europa collegato alla rete elettrica. La manifestazione, che è stata organizzata congiuntamente dall'UFE, da SWISSOLAR e dall'AES, ha riscontrato notevole successo (più di 200 partecipanti) e ha permesso di far conoscere ulteriormente le attività del laboratorio sia a livello locale che svizzero.
- Nell'ambito della formazione continua della SUPSI, sono stati impartiti due corsi sul fotovoltaico, nel 2000 rispettivamente nel 2003. Il primo, che era rivolto ad elettricisti e progettisti, ha attirato numerosi professionisti anche dall'Italia. Il secondo è stato rielaborato e rivolto agli architetti.
- Nel 2002 il TISO ha tenuto, presso la SPAI di Mendrisio, un corso sul fotovoltaico di rivolto ad una trentina di montatori elettricisti che si stanno preparando per l'esame professionale superiore (EPS) per conseguire il diploma federale di maestro elettricista: il corso impartito sarà materia d'esame.
- L'associazione Arché Italia ha organizzato a Como, nel 2003, un "Corso di progettazione ecologica"; il TISO è stato chiamato ad impartire, a 53 architetti, il modulo "Produrre energia con il sole, il PV nell'edificio ecologico".
- Dal 2002 il TISO partecipa alle giornate tecniche per ragazze, organizzate annualmente dalla SUPSI. Nel suo atelier vengono trattati i metodi di sfruttamento dell'energia solare nell'edificio.
- Nel 2001 il TISO ha tenuto a Roma un corso di 4 giorni, organizzato da RomaEnergia, che comprendeva pure la realizzazione pratica di alcuni impianti collegati alla rete. Il corso è stato seguito sia da progettisti che da installatori, complessivamente 47 partecipanti.
- Nel 2003, presso la Scuola Media di Canobbio, è stato realizzato un impianto PV da 1kW collegato alla rete, con la stretta collaborazione degli allievi di quarta media nell'ambito del corso di elettricità. Il TISO ha fornito il supporto tecnico necessario, mentre i costi sono stati sostenuti interamente dal Cantone e da Greenpeace.
- Nel 2003 il TISO ha preparato e sta coordinando un progetto didattico analogo, tuttora in corso, ma rivolto ai 5 licei cantonali, finanziato da Greenpeace, dal BUWAL e dal Cantone. In alcune sedi il progetto verrà presentato come lavoro di maturità, in altre verrà inserito nel normale programma di insegnamento.

7 CONSULENZE E SERVIZI ESTERNI

- **Impianto fotovoltaico Scuole Comunali Locarno :**

sostituzione dell'ondulatore solare, ottobre e dicembre 2000.

- **Impianto fotovoltaico , Progetto Via Pessina, Como :**

rilevamento dell'orizzonte, simulazioni di produzione energetica di diverse varianti e pre-scelta del tipo di moduli per un impianto fotovoltaico su terrazza di condominio abitativo, febbraio 2000.

- **Impianto fotovoltaico "Stand alone" Bolivia per conto dell'Associazione COSMOPOLIS :**

Il LEEE ha aiutato l'Associazione COSMOPOLIS a realizzare un impianto PV autonomo da 160Wp (230Ah, 12V) in Bolivia, La Paz, dipartimento Potosì (3'630 m.s.m), destinato all'illuminazione di un centro di tosatura. Il LEEE ha offerto i moduli, la progettazione, la simulazione, la comanda del materiale, la prova d'assemblaggio dell'impianto completo, e un **corso** sul fotovoltaico . giugno 2001.

- **Impianto fotovoltaico Scuole Comunali Magliaso :**

interventi di ripristino funzionamento ondulatore, febbraio 2001.

- **Impianto fotovoltaico AMB presso Scuole Comunali Bellinzona-Semine :**

sostituzione dell'ondulatore solare, febbraio 2002.

- **Termografia quadri elettrici per ditta Tech-Management :**

analisi termografica preventiva dei quadri elettrici di distribuzione principali della Banca del Gottardo a Lugano per conto della ditta Tech Management, incaricata della manutenzione dell'impiantistica dell'edificio , dicembre 2003.

- **Impianto fotovoltaico Kraftwerk 1 , Zürich, per ditta ENECOLO :**

analisi termografica dei differenti sistemi di supporto dei moduli dell'impianto PV, giugno 2002.

- **Consulenze per AET :**

Nell'ambito del presente progetto 2000-2003 è stata fornita una significativa consulenza riguardante gli impianti fotovoltaici dell'AET sia per l'analisi e il risanamento di quelli già presenti, sia per l'acquisizione e la progettazione per impianti nuovi. Qui di seguito un elenco delle principali consulenze fornite all'AET :

- Risanamento dell'impianto da 3 kWp (AET I) situato presso il centro comando AET di Monte Carasso
- Risanamento dell'impianto da 18 kWp (AET II) situato presso la stazione ferroviaria di Giubiasco.
- Monitoraggio e manutenzione dell'impianto risanato di 100kW (AET III)
- Analisi per risanamento dell'impianto 180 kWp UBS Suglio-Manno.
- Analisi per risanamento dell' impianto 3 kWp UBS Ascona.
- Analisi per risanamento dell'impianto 3 kWp UBS Lugano-Via Pretorio.
- Consulenza per analisi e progettazione impianto su ripari fonici presso ponte diga di Melide-Bissone.
- Consulenza per progettazione e monitoraggio dell'impianto 15 kW Centro Professionale Lugano Trevano (CPT) – BESS (vedi Progetto BfE: CPT Solar).

- **Impianto collegato alla rete , Dr. Togni a Gudo :**

- verifica calcoli e consulenza varia, ottobre 2000
- misura I-V (STC) di 4 moduli & rapporto delle misure, giugno 2000
- progettazione sistema d'acquisizione dati, ottobre 2000

- **Impianto collegato alla rete da 50 kW in località Villadossola (I) :**

predimensionamento di un impianto da 50kW (417 m²) collegato alla rete, in località Villadossola, Verbania (I), per il Sig. Claudio Sciągata. Il TISO ha progettato 2 varianti: sul terreno (in sheds) e in facciata. Data: 9 aprile 2001.

- **Impianto autonomo in Nicaragua :**

analisi e calcoli pre dimensionamento per impianto fotovoltaico, marzo 2000.

- **Impianto fotovoltaico a Cardada-Cimetta :**

sopralluogo, analisi e calcoli di pre dimensionamento per impianto fotovoltaico, giugno 2001.

- **Impianto fotovoltaico all'aerodromo militare di Magadino :**

analisi e calcoli di dimensionamento per un impianto fotovoltaico da 85kW, novembre 2003.

- **Consulenza per Elettro Studio Nicoli SA :**

Consulenza per progetto di lavoro di una ditta del settore elettrico, luglio 2003.

- **Servizio per progetto "DünnFilmTest" della ditta Energiebüro :**

misura della curva I-V indoor e outdoor di diversi moduli a film sottile, ottobre 2002.

- **Servizio per ditta ASM Brescia :**

misure e collaudo di 32 moduli Sharp NE-Q5E2E per l'accettazione di un lotto da 42 kW, febbraio 2003.

- **Servizio per ditta Astropower :**

misura della curva I-V indoor e outdoor di 2 moduli Astropower (AP-100 e APx-110-SL), marzo 2003.

- **Servizio per ditta Solar Projekt Energiesysteme GmbH :**

misura della matrice $P=f(G,T)$ del modulo US64, marzo 2003.

- **Servizio fornitura dati meteo , Sig. Ferrari :**

fornitura dati di insolazione annua in 4 punti nel comune di Lodrino (con orizzonte) per il Granconsigliere Ferrari; maggio 2003.

- **Vari :**

numeroso consulenze sono state fornite al pubblico e a studenti SUPSI e di altre scuole per domande riguardanti la realizzazione, il risanamento o la modifica di impianti autonomi o collegati alla rete elettrica pubblica. Inoltre sono state rilasciate varie informazione riguardanti dati tecnici e criteri di scelta di moduli, regolatori di carica e di ondulatori, nonché sui rivenditori degli stessi.

8 COLLABORAZIONI NAZIONALI ED INTERNAZIONALI

8.1 Nazionali

- Enecolo AG, Mönchaltorf;
- PSI (Paul Scherrer Institut), Villingen;
- Meteotest, Bern;
- Solterra, Chiasso;
- AET (Azienda Elettrica Ticinese), Bellinzona;
- Gesellschaft Mont-Soleil, St. Imier;
- Ufficio Risparmio Energetico, Bellinzona;
- Energiebüro, Zürich;
- CUEPE, Geneve;
- 3S (Swiss Sustainable Systems AG), Bern;
- Greenpeace, JugendSolarProjekt Schweiz;
- Scuola media Canobbio, licei cantonali;
- Rätia Energie AG, Poschiavo;
- IFEC, Rivera;
- Belval SA, Valangin;
- Sarnafil International, Sarnen;
- Sarnafil Ticino, Lamone;
- Sezione Logistica Cantone Ticino;
- SPAI (Scuola Professionale Artigianale e Industriale), Mendrisio;
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) – Divisione Comunicazione Educazione Ambientale, Bern;
- Studio Architettura Claudio Lo Riso, Lugano;
- NTB (Interstaatliche Hochschule für Technik), Buchs;
- Associazione Cosmopolis, Massagno;
- Officine Borra, Cama;
- Elettro Studio Nicoli SA, Lugano;
- Studio Ingegneria Ghidossi SA, Bellinzona.

8.2 Internazionali

- ESTI (European Solar Test Installation), Centro Comune di Ricerca di Ispra (I);
- Gechelin Group, Tiene (I);
- Associazione Arché Italia, Como (I);
- Roma Energia, Roma (I);
- Gilberto Mattiuzzi (I);
- Evergreen Solar (USA);
- Bekaert ECD Solar Systems Europe N.V. (B);
- BP Solar (GB);
- WIP – Renewable Energies, München (D);
- ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik), Kassel (D);
- ECN (Energy research Centre of the Netherlands), Petten (NL);
- CREST Loughborough University, Leicestershire (UK).

9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE

2000:

16th European PVSEC; Glasgow (GB), maggio 2000:

- **BEHAVIOUR OF TRIPLE JUNCTION A-Si MODULES**
- **18 TYPES OF PV MODULES UNDER THE LENS**
- **BEHAVIOUR OF M-Si PLANT APPROACHING ITS 20-YEAR DESIGN LIFE**

Simposio fotovoltaico nazionale svizzero 2000; Neuchâtel (CH), novembre 2000:

- **DETERMINATION OF THE MEAN TIME BEFORE FAILURE OF A 20-YEAR OLD PV PLANT**
- **SUN SIMULATOR OF LEEE-TISO**
- **ENERGIEPRODUKTION UND LEISTUNGSVERMINDERUNG VERSCHIEDENER PV MODULE**

2001:

16th Photovoltaic Symposium; Staffelstein (D), marzo 2001:

- **ENERGY PRODUCTION AND POWER LOSS IN PV MODULES**
- **DETERMINATION OF THE MEAN TIME BEFORE FAILURE OF A 20-YEARS OLD PV PLANT**
- **SUN SIMULATOR OF LEEE-TISO**

17th European PVSEC; Monaco (D), ottobre 2001:

- **STUDY OF A 20-YEAR OLD PV PLANT (MTBF PROJECT)**
- **ENERGY RATING OF PV MODULES**
- **POWER AND ENERGY PRODUCTION OF PV MODULES**
- **PV MODULE BEHAVIOUR IN REAL CONDITIONS: EMPHASIS ON THIN FILM MODULES**

2002:

PV in Europe Conference; Roma (I), ottobre 2002:

- **POWER AND ENERGY PRODUCTION OF PV MODULES**
- **MONITORING CIS ST. MORITZ**
- **RECOVERY OF A 100 kW PV POWER PLANT**
- **MATRIX METHOD FOR ENERGY RATING CALCULATIONS OF PV MODULES**
- **TISO 10kW PLANT THE OLDEST GRID CONNECTED PV SYSTEM IN EUROPE**

Simposio fotovoltaico nazionale svizzero 2002; Lugano-Trevano (CH), maggio 2002:

- **LE ATTIVITÀ PV DEL LEEE-TISO**
- **MODULE ENERGY RATING: THE MATRIX METHOD**
- **MONITORING OF 16.8 THE kWp P-PLANT WITH CIS MODULES IN ST. MORITZ**
- **RISANAMENTO DELL'IMPIANTO PV MARK II (AET III) 100kW**
- **1982 - 2002: STATE OF THE 1ST GRID-CONNECTED PV PLANT IN EUROPE**

EUROSUN 2002; Bologna (I), giugno 2002:

- **THE OLDEST GRID-CONNECTED PV PLANT IN EUROPE: STUDY AND FIRST RESULTS**

2003:

3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; Osaka (J), maggio 2003:

- **ANALYSIS OF WEATHERED C-Si PV MODULES**
- **POWER AND ENERGY PRODUCTION OF PV MODULES - CONSIDERATIONS OF 10 YEARS ACTIVITY**
- **ENERGY RATING OF PV MODULES: COMPARISON OF METHODS AND APPROACH**

10 PUBBLICAZIONI INFORMATIVE

- Rivista “Installatore”, maggio 2001; Rivista di Lugano, luglio 2001:
 - **IL LABORATORIO DI ENERGIA, ECOLOGIA ED ECONOMIA (LEEE)**
- Riviste Photon, 5/2002 (in tedesco) e Photon International 5/2002 (in inglese):
 - **EXPERTEN MIT TRADITION**
 - **ERTRAG IST WICHTIGER ALS LEISTUNG**
- Rivista Fotovoltaici:
 - **QUALITÀ E RESA ENERGETICA DI MODULI E IMPIANTI FV (2/2002)**
 - **STUDIO DI UN METODO PER IL PRONOSTICO DELLA RESA ENERGETICA ANNUALE DI UN MODULO (5/2002)**
- Rivista Ticino Management; marzo 2002:
 - **SONNEN-STUFE**
- Rivista Isoleatrecentosessantagradi (Newsletter mensile di ISES ITALIA); luglio-agosto 2003:
 - **DURATA DI VITA ED AFFIDABILITÀ DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO**

11 WORKSHOP E PRESENTAZIONI

- WORKSHOP “Vergleichender Modulertrag”; Zürich (CH), marzo 2002:
 - **ERTRAGSMESSUNGEN UNTER REALEN BEDINGUNGEN (D. CHIANESE, G. FRIESEN)**
- SUNWEEK 2002; Milano (I), giugno 2002:
 - **VERIFICA DELLE PRESTAZIONI DI MODULI PV AL LEEE-TISO (G. FRIESEN)**
- WORKSHOP “Leistung und Energieerträge von Solarmodulen”; Cölbe (D), settembre 2002:
 - **LEISTUNG UND ENERGIEERTRÄGE VON SOLARMODUELN (G. FRIESEN)**
- 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; Osaka (J), maggio 2003 (invited speaker):
 - **ANALYSIS OF WEATHERED C-SI PV MODULES (D. CHIANESE)**

Partecipazione a PVNET Workshop “RTD Strategy for PV”, 30-31 May 2002, JRC Ispra (I)

Partecipazione al Workshop on PV System Monitoring Methodology, 8-9 September 2003, JRC Ispra (I)

12 RICONOSCIMENTI

Il premio solare svizzero 2001, sotto l'egida dell'Ufficio Federale dell'Energia e in collaborazione con le associazioni professionali che lo sostengono, è stato attribuito al LEEE-TISO nella categoria “personalità e istituzioni”.

Nel 2001 il premio è stato attribuito a collettività pubbliche, progettisti, architetti e ingegneri, proprietari di installazioni, istituzioni e personalità, che si sono distinte per il loro impegno a favore dell'energia solare.

“... Les personnalités et les institutions, si elles ne font pas l'objet de candidatures directes mais sont des propositions de la commission, constituent une catégorie dont le rôle est important. Elles assurent le relais indispensable auprès des instances publiques, politiques et administratives, sans lequel tout projet pionnier et novateur ne pourrait être reconnu. Elles encouragent ainsi les efforts consentis par les initiatives individuelles et privées pour leurs investissements à long terme en vue d'une plus grande indépendance énergétique. A ce titre, le laboratoire d'énergie solaire de l'HES du Tessin, implanté à Trévano, est primé pour les travaux de tests systématiques qu'il a réalisés depuis plusieurs années. ... »

Marc Collomb, Président du Prix Solaire Suisse, Lausanne

La consegna del premio è avvenuta a Basilea il 21 settembre 2001.



Figura 90: Consegna del Premio Solare Svizzero 2001; da sinistra: Dr. Walter Steinmann, direttore dell'Ufficio federale dell'Energia; Dr. Angelo Rossi, direttore SUPSI; Dr. Mario Camani, caposezione della sezione della protezione dell'aria, dell'acqua e del suolo (SPAAS) del Cantone Ticino e già responsabile e fondatore del TISO; ing. Domenico Chianese, resp. LEEE-TISO; Dr. Giorgio Travaglini, Euresearch e già responsabile del Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia (LEEE).

<http://www.solaragency.org/Solarpreise/default.htm>

13 CONCLUSIONI

Nel corso degli ultimi quattro anni è stato possibile imprimere una svolta alle attività del LEEE-TISO realizzando gli obiettivi principali previsti. I punti salienti delle attività al LEEE-TISO sono stati:

- L'installazione di un simulatore solare e l'accreditamento secondo la norma ISO 17025 delle misure corrente-tensione di moduli al silicio cristallino.
- La continuazione del confronto annuale in condizioni climatiche reali.
- La creazione di un metodo semplificato del pronostico della resa energetica.

I test implementati hanno permesso di ottenere delle informazioni importanti, tra cui:

- ◇ I moduli al silicio cristallino hanno un rapido degrado iniziale (ca. -2-3%) per poi stabilizzarsi.
- ◇ La potenza reale stabilizzata misurata non è quasi mai conforme alla potenza nominale ma alla potenza minima dichiarata dai fabbricanti.
- ◇ Le differenze di produzione di energia nei moduli c-Si dipendono dalla veridicità delle dichiarazioni dei fabbricanti piuttosto che da differenze tecnologiche reali.

La pubblicazione di queste informazioni, uniche nel loro genere, ha contribuito a cambiamenti importanti nella definizione della potenza nominale dei fabbricanti. In particolare le tolleranze di produzione sono state migliorate così come la qualità dei moduli immessi sul mercato.

Presso il LEEE-TISO i progettisti e gli installatori hanno a disposizione un servizio di qualità per la misura della potenza dei moduli PV e la verifica del materiale acquistato.

Misure indoor:

Nel 2000 è stato possibile mettere in funzione e, nel 2001, accreditare ISO17025 le misure I-V di moduli c-Si, secondo la norma IEC 60904-1, con un simulatore solare di classe A. L'accreditamento ha richiesto una riorganizzazione amministrativa del laboratorio, che comunque ha potuto essere contenuta grazie alla collaborazione del laboratorio LTS del medesimo dipartimento (DACD) della SUPSI. I lavori principali sono stati:

- Ingrandimento e preparazione della camera oscura.
- Installazione del simulatore solare.
- Prove di verifica e Round Robin test con altri istituti internazionali.
- Calibrazioni e taratura sistematica delle apparecchiature.
- Preparazione della documentazione per l'accreditamento.

Le misure di moduli c-Si con il simulatore solare hanno una incertezza del $\pm 2\%$ su P_m (senza correzione di mismatch dovuto allo spettro). I risultati delle misure di ripetibilità sono comprese in un intervallo del $\pm 1\%$ e tipicamente del $\pm 0.5\%$.

Nel corso del 2003 sono state effettuate 377 misure di servizio per terzi, su un totale di più di 2000 flash annuali (comprese le misure di verifica e le misure nell'ambito dei progetti di ricerca).

Modifica della procedura di test e misure di potenza:

- La procedura di collaudo dei moduli PV è stata modificata per tener conto delle osservazioni ottenute nei test:
 6. I moduli al silicio c-Si subiscono un degrado di ca. il -2% nel corso delle prime ore di esposizione alla luce $\Rightarrow 20\text{kWh/m}^2$ di light soaking. Dopo 3 mesi il degrado medio è del -2.7%.
 7. I moduli thin film si stabilizzano dopo un minimo di tre mesi di esposizione alla luce \Rightarrow La durata dei test è ora di: $3+12 = 15$ mesi.
 8. I moduli in prova sono misurati a STC ogni 3 mesi col nuovo simulatore solare del LEEE-TISO accreditato ISO17025.

9. I parametri di funzionamento dei moduli (I_m , V_m , T_{bom}) e i dati climatici sono misurati ogni minuto con il nuovo sistema di acquisizione dati.
10. Il degrado avviene essenzialmente in Isc. A partire dai 3 mesi di esposizione non si nota nessun ulteriore degrado, la potenza è stabile.

Confronto della resa energetica:

- Le differenze di produzione **annuale** dei moduli sono elevate se riferite alla **potenza nominale P_n** (differenza “commerciale”), perché la potenza reale non corrisponde alla potenza nominale.
- Per i moduli al silicio cristallino le differenze possono arrivare fino al **16%**.
- Le differenze di produzione **annuale** dei moduli sono più limitate se riferite alla **potenza reale misurata e già stabilizzata P_{15}** (differenza “tecnologica”).
- Per i moduli al silicio cristallino le differenze possono arrivare fino al **7%**.
- Il fabbricante che dichiara una potenza nominale conforme alla potenza reale stabilizzata, è premiato con una resa energetica superiore (riferita alla potenza nominale).

Comportamento in condizioni reali:

- La produzione istantanea e mensile è invece più differenziata e le differenze sono più evidenti nei periodi a bassa insolazione. Tuttavia la produzione annuale è limitata in questa frazione di insolazione e nei sistemi collegati alla rete questo dato non è determinante. Questi dati sono invece interessanti in caso di utilizzo dei moduli solo in determinati periodi dell'anno come nel caso dei sistemi autonomi.

Garanzie dei moduli:

- Nel corso degli ultimi anni i fabbricanti hanno modificato i **limiti** e i **riferimenti** della garanzia sulla potenza.
- Per un pronostico della resa energetica è più sensato utilizzare il valore della potenza minima dichiarata (P_{min}) piuttosto che la potenza nominale (P_n).

Metodo delle matrici per il pronostico della resa energetica:

- Un metodo per il calcolo della resa energetica denominato **metodo delle matrici** è stato sviluppato e la sua precisione è risultata buona.
- Il metodo delle matrici è utilizzabile con un semplice foglio di calcolo elettronico (stile Excel).
- Un periodo di misura ridotto a poche settimane può essere sufficiente per una caratterizzazione completa di un modulo al silicio cristallino.
- Le misure a medio termine sono indispensabili per monitorare il comportamento delle nuove tecnologie in diretto confronto con il silicio cristallino tradizionale e per intensificare lo studio di quelle tecnologie per cui non è ancora possibile fare un pronostico preciso come per il silicio cristallino.

A coronare le attività del LEEE-TISO sono giunti:

- ◇ nel 2001, il riconoscimento del premio solare svizzero nella categoria “Istituzioni”.
- ◇ Nel 2002, il Simposio Nazionale Fotovoltaico a Lugano-Trevano, a sottolineare i 20 anni di attività del LEEE-TISO.
- ◇ nel 2003, l'invito per una presentazione alla conferenza mondiale, tenutasi ad Osaka (Japan). Il LEEE-TISO ha partecipato con 3 presentazioni (un “invited paper”, una presentazione orale ed un poster).

Nella nuova norma EN50380: “Datasheet and nameplate information for photovoltaic modules”, le informazioni sul modulo dovranno comprendere i dati di funzionamento a varie condizioni climatiche e non solo alle condizioni standard STC. Il nuovo armadio termostatico acquistato recentemente, permetterà di effettuare le misure I-V con temperature fino a 70°. Le direttive stabilite dalla norma EN50380 vanno nella direzione di informazioni più dettagliate per il pronostico della resa energetica, come proposto nel metodo delle matrici implementato dal LEEE-TISO.

Il mercato mondiale è ancora dominato dai moduli al silicio cristallino. Nel futuro ci si attende ad un incremento delle quote di mercato dei moduli thin film. I progettisti necessitano però di informazioni e di confronti affidabili anche per queste nuove tecnologie (a-Si, CIGS, CdTe, ecc.). Tuttavia le misure in condizioni standard STC dei moduli thin film devono essere affidabili e riproducibili. Ulteriori studi sono necessari in questo campo di attività, sia per le misure indoor con un flash Sun Simulator, sia per le misure outdoor della caratteristica I-V. (corto termine outdoor). Il metodo delle matrici per il pronostico della resa energetica dovrà essere predisposto e verificato anche per questi tipi di tecnologie emergenti.

Le informazioni raccolte dovranno ancora essere messe a disposizione in una forma idonea per i progettisti, per esempio come tools di applicazioni o documenti facilmente accessibili non solo per esperti del ramo.

L'elettronica degli stand di prova, in funzione da più di 8 anni all'esterno, dovrà essere ripristinata e modificata in modo da poter soddisfare le nuove esigenze di potenza e le nuove funzioni richieste per i vari tipi di moduli. A tal fine essa sarà riprogettata per garantire una potenza di funzionamento superiore, la possibilità di scansione completa della caratteristica I-V e facilitare la visualizzazione e il controllo dei dati, oltre a mantenere le funzionalità MPP delle precedenti apparecchiature elettroniche.

14 RINGRAZIAMENTI

- Dr. Paolo Rossi direttore, ing. Giampaolo Mameli, Azienda Elettrica Ticinese, Bellinzona (CH).
- Dr. Stefan Nowak, Stephan Gnos, NET, St. Ursen (CH).
- Dr. Heinz Ossembrink, Dr. Ewan Dunlop, Wim Zaaiman; Dr. Tony Sample, Robert Kenny; ESTI. JRC Ispra (I).
- M.J. Jansen, Nico J.C.M. van de Borg, Eikelböm ECN (NL).
- Marco Pierro, dir. Bruno Salsedo, RomaEnergia, Roma (I).
- Steve Ransome, BP Solar, (UK).
- Markus Real, Alphareal AG, (CH).
- Pierre Beljean, BELVAL SA, (CH).
- Andy Caplazi, Phoenix Contact, Tagelswangen (CH).
- Dr. Maarten van Cleef, Dr. Paul Lippens, Beckaert Europe Solar System (BESS), Zulte (B).
- Dr. Mario Camani, Arch. Mario Bricoola, Arch. Bruno Vitali; Sezione della protezione dell'aria, dell'acqua e del suolo (SPAAS), Dipartimento del Territorio (DT), Cantone Ticino, Bellinzona (CH).
- Ing. Massimo Martignoni, Arch. Fernando Cattaneo, Arch. Paolo Bianchi, Arch. Carlo Valsecchi; Sezione della logistica, Dipartimento delle Finanze e dell'Economia (DFE), Cantone Ticino, Bellinzona (CH).
- Paolo Jacomelli, traduttore, Cademario (CH).
- Dr. Giorgio Travaglini, Euresearch, Bern (CH).
- Ing. Hermann Zumstein, Roberto Moresi, Azienda Elettrica Ticinese, Bellinzona (CH).
- Dr. Wilhelm Dürisch, PSI, Villigen (CH).