

Rapporto finale PV P+D, DIS 43907 / 83947, Dicembre 2005

Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III a Riazzino

elaborato da
Sandro Rezzonico, Enrico Burà
LEEE-TISO, DACD, SUPSI
6952 Canobbio



Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III a Riazzino

| | |
|-----------------------------------|--|
| Author and Co-Authors | Sandro Rezzonico and Enrico Burà |
| Institution / Company | LEEE-TISO, DACD, SUPSI |
| Address | 6952 Canobbio |
| Telephone, Fax | +41 58 666 63 52 , +41 58 666 63 49 |
| E-mail, Homepage | sandro.rezzonico@supsi.ch , enrico.bura@supsi.ch , www.lee.e.supsi.ch |
| Project- / Contract Number | 43907 / 83947 |
| Duration of the Project (from-to) | 01.01.2002-31.12.2004 |

The AET III 100 kW grid connected PV plant, located in Riazzino, was installed in 1992 by the TNC company on behalf of the Swiss Federal Office of Energy. In 2001 the plant was renovated. The old 100kW converter was substituted by three new converters, 33kW each, and part of the wiring was redone. The renovated PV plant was put into service on November the 30th 2001, then it was acquired by AET and renamed AET III (originally Mark II). This project was intended to precisely monitor for three years the plant behaviour after renovation, by continuous and annual measurements. The data acquisition system was adapted to the new configuration and it was put back into operation at the beginning of the year 2002.

The behaviour of the plant has being yet analysed for 3 years: since its renovation the plant has been working properly. Its PR now exceeds 70% (right from 65 W/m²), and it is the best one of the previous years. During three years, the plant produced respectively 95.977 MWh (2002), 115.322 MWh (2003) and 108.492 MWh (2004); the 2003 and 2004 annual productions exceed the limit of 100 MWh/a, data never reached in the 11 previous years of operation (maximal production 98.5 MWh in 1999, average 93.5 MWh). This is due to the favourable meteorological conditions and, in particular, to the excellent new converters performance. The energy yields (for example $Y_{f_{2003}}=1'103$ kWh/kWp.y) clearly exceed the production estimation of 95-100 MWh. From 1992 up to now the PV plant has produced 1'012,941 MWh, which corresponds to a total inverters operating time of 34'426 hours (31.12.2004).

As always observed the eight strings connected to Box 1 produce more than the eight of Box 6. Nevertheless, all the 48 strings work properly. The 26 reference modules have been indoor measured again by the LEEE: their mean maximum power is 106.3 W, therefore the total estimated field power @STC is 91.9 kW. This value is 11.2 % lower than the one declared by the manufacturer. Moreover, another Infra-Red analysis of the entire plant has been carried out: a few hot spots have been found, but many of them have a high temperature (ΔT up to +100°C). One module with broken glass was replaced, and incredibly the same module was found broken again after few months. However the plant doesn't show any relevant or serious problem.

Sommario

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Introduzione | 3 |
| 1.1. | Descrizione dell'impianto | 3 |
| 1.2. | Risanamento: modifiche e messa in servizio | 3 |
| 1.3. | Obiettivi e importanza del progetto | 4 |
| 2. | Il sistema d'acquisizione dati | 6 |
| 2.1. | Descrizione | 6 |
| 2.1.1. | Monitoraggio principale dell'impianto | 6 |
| 2.1.2. | Monitoraggio delle stringhe | 7 |
| 2.1.3. | Software e trasmissione dei dati | 8 |
| 2.2. | Il formato dati IEA | 10 |
| 3. | Misure in continuo | 13 |
| 3.1. | Monitoraggio principale dell'impianto | 13 |
| 3.1.1. | Comportamento in temperatura : coefficienti α , β , e k | 13 |
| 3.1.2. | Potenza: valori di punta, a 25°C, frequenze e matrici | 16 |
| 3.1.3. | Performance Ratio (PR) e Final Yield (Yf) orari, giornalieri e mensili | 20 |
| 3.1.4. | Comportamento degli ondulatori | 23 |
| 3.1.5. | Produzione di energia, PR e Yf annuali | 25 |
| 3.1.6. | Principali indici di funzionamento: dati mensili formato IEA | 28 |
| 3.2. | Monitoraggio delle stringhe | 31 |
| 4. | Misure puntuali annuali | 34 |
| 4.1. | Misure a STC dei moduli di riferimento | 34 |
| 4.1.1. | Potenze @ STC | 34 |
| 4.1.2. | Isc e Fill Factor (FF) @ STC | 40 |
| 4.1.3. | Curve IV @ STC | 41 |
| 4.2. | Analisi termografica | 43 |
| 4.2.1. | Introduzione | 43 |
| 4.2.2. | Influenza delle scatolette di collegamento (terminal box) | 43 |
| 4.2.3. | Distribuzione della temperatura | 44 |
| 4.2.4. | Moduli con hot spots | 47 |
| 4.2.5. | Moduli con mal funzionamenti | 49 |
| 4.2.6. | Risultati e commenti | 50 |
| 4.3. | Misura I-V outdoor | 51 |
| 4.3.1. | Potenze e curve IV | 51 |
| 4.3.2. | Risultati e commenti | 53 |
| 5. | Manutenzione impianto | 55 |
| 5.1. | Pulitura dei moduli | 55 |
| 5.2. | Sostituzione moduli rotti | 55 |
| 5.3. | Atti di vandalismo | 56 |
| 6. | Conclusioni | 57 |
| 7. | Collaborazioni nazionali e internazionali | 62 |
| 8. | Ringraziamenti | 62 |
| 9. | Referenze e pubblicazioni | 62 |

1. Introduzione

1.1. Descrizione dell'impianto

L'impianto fotovoltaico collegato alla rete AET III (ex MARKII) è stato messo in funzione nel mese di novembre del 1992. È composto da 864 moduli fotovoltaici Solarex MSX120Q p-Si da 120W ciascuno, per una potenza nominale totale di 103.7kWp. I moduli sono inclinati a 45° e orientati a 15° ovest. L'impianto si situa lungo il tracciato ferroviario Bellinzona-Locarno in prossimità della stazione ferroviaria di Riazzino-Cugnasco e sfrutta un sedime non altrimenti utilizzabile; si estende per 400m e la superficie totale dei moduli è di 961m².

Durante i primi anni di funzionamento molti moduli hanno mostrato una diminuzione del rendimento. Nel 1995 sono stati sostituiti dal fabbricante 177 moduli dell'impianto. Nel 1996 sono stati identificati altri moduli con un basso rendimento e nel 1998 il fabbricante ha sostituito anche i 687 moduli rimanenti. Nell'ottobre 2000 l'impianto è andato fuori servizio a causa di problemi all'ondulatore riconducibili all'esondazione del lago Maggiore.

1.2. Risanamento: modifiche e messa in servizio

Nel 2001 il LEEE è stato incaricato del suo risanamento, della manutenzione, e della rimessa in servizio dell'acquisizione dati: in particolare il vecchio ondulatore da 100kW è stato sostituito con tre ondulatori da 33kW ciascuno, e parte del cablaggio è stato rifatto. Il nuovo cablaggio è composto da 48 stringhe da 18 moduli in serie. La tensione di sistema è passata da $\pm 410V$ a 800V e quindi i sistemi di protezione e di misura hanno dovuto essere sostituiti. È stato inoltre necessario costruire un locale tecnico rialzato per contenere le nuove apparecchiature ed evitare problemi alle parti elettrico-elettroniche nei periodi di esondazione del Lago Maggiore. Non è stata invece apportata nessuna modifica alla struttura meccanica di sostegno dei moduli.

L'impianto ristrutturato è operativo da dicembre 2001, e il nuovo sistema d'acquisizione dati, che è stato adattato alla configurazione attuale, è in funzione dal 26 febbraio 2002.

Per informazioni più dettagliate si rimanda il lettore al rapporto finale del progetto BFE n° 39971.



Figura 1: Impianto -MARK II- prima del risanamento (sopra) e impianto -AET III- dopo il risanamento (a lato)

1.3. Obiettivi e importanza del progetto

Con il presente progetto si è voluto monitorare accuratamente per un periodo di 3 anni il comportamento dell'impianto AETIII da 100kW a seguito del suo risanamento, tramite una campagna di misura dettagliata (misure in continuo), nonché misure annuali puntuali.

Gli obiettivi generali del progetto erano:

- Il monitoraggio dell'impianto e delle singole stringhe: in particolare la misura della resa energetica in termini di indice di produzione (Yf) e di Performance Ratio (PR).
- L'identificazione di eventuali stringhe mal funzionanti rispettivamente diversità di comportamento tra le stesse.
- La verifica qualitativa del buon funzionamento dell'impianto e la localizzazione rapida di eventuali surriscaldamenti locali, guasti o altri problemi tramite misure termografiche e misure I-V outdoor.
- La verifica della stabilità della potenza @ STC tramite la misura annuale indoor di 26 moduli di riferimento.

Il progetto si componeva di 6 fasi che comprendevano lo svolgimento dei seguenti lavori:

- Risanamento–lavori preliminari (fase 1): concezione, costruzione parziale e modifiche del sistema di acquisizione dati, sostituzione delle parti danneggiate, calibrazione dei valori, ecc. Nota: buona parte dei lavori di questa fase (iniziata in luglio 2001) sono stati eseguiti nell'ambito di un altro contratto (risanamento dell'impianto, BFE project n° 39971).
- Preparazione del software (fase 2): programmazione dataloggers, creazione di altri programmi, messa in servizio dell'acquisizione dati
- Misura in continuo (fase 3): monitoraggio dell'impianto e delle stringhe e valutazione dei dati
- Misure annuali (fase 4): termografia, misura I-V outdoor, misura @ STC di moduli di riferimento
- Confronto con gli altri impianti PV in Ticino (fase 5)
- Diffusione dei risultati (fase 6): rapporti annuali e finale BFE, partecipazione alle conferenze

L'importanza della campagna di misura svolta può essere riassunta dai seguenti punti:

- La verifica della corretta esecuzione dei lavori di risanamento e il miglior funzionamento dell'impianto rispetto al passato, dovuto al miglior dimensionamento degli ondulatori e alla miglior qualità degli stessi.
- La verifica della stabilità dei moduli vista la serie di problemi riscontrati in passato; per un funzionamento ottimale e durevole è importante mettere in risalto immediatamente eventuali "problemi di gioventù".
- L'acquisizione del "know-how" sul funzionamento di un grosso impianto, e ciò anche a scopi didattici; potrà portare a delle collaborazioni future con enti pubblici o privati.

2. Il sistema d'acquisizione dati

2.1. Descrizione

Il sistema d'acquisizione si suddivide in 2 sottosistemi, uno principale (centralizzato: monitoraggio dettagliato dell'impianto) e uno secondario (dislocato sul campo: monitoraggio dettagliato delle stringhe). Due modem analogici permettono l'interrogazione a distanza dei due sistemi d'acquisizione dati.

L'acquisizione dei dati è stata rimessa in funzione il 26 febbraio 2002. Il setup dei canali è stato rivisto completamente e i dataloggers sono stati riprogrammati. Alcuni trasmettitori di segnale sono stati sostituiti perché non più conformi con i parametri della nuova configurazione dell'impianto. Sono stati aggiunti alcuni sensori di temperatura sia per l'aria sia per i moduli. I segnali dei piranometri sono stati calibrati con dei sensori di riferimento.

2.1.1. Monitoraggio principale dell'impianto

Scopo delle misure: questo monitoraggio di base permette di verificare il buon funzionamento dell'impianto a seguito dei lavori di risanamento, nonché di gestire i segnali in uscita destinati al pannello illustrativo.

Descrizione del sistema di acquisizione : il sistema d'acquisizione principale è composto da un datalogger Campbell CR10 al quale sono collegati un multiplexer (AM416 Realy Multiplexer), che permette il multiplexaggio di 32 canali, una carta a 8 canali per contare gli impulsi (SDM-SW8A Pulse Count Module) e 2 carte con 4 uscite analogiche (SDM-A04 Analog Output Module). Il sistema permette di trattare un centinaio di canali (letti e calcolati).

Descrizione delle misure: i valori misurati sono riportati in dettaglio qui di seguito:

Meteo:

- Irraggiamento e insolazione globale orizzontale
- Irraggiamento e insolazione globale sul piano dei moduli (est e ovest)
- Ore di sole
- Temperatura dell'aria
- Temperatura dei moduli
- Temperatura e corrente della cella di riferimento
- Velocità e direzione del vento

Valori DC:

- Tensione, corrente, e potenza DC campo 1, 2 e 3
- Potenza ed energia totale DC
- Ore di funzionamento campo 1, 2 e 3
- Rendimento campi (calcolato)

Valori AC:

- Tensione e corrente AC delle tre fasi L1, L2 e L3
- Potenza ed energia totale AC
- Ore di funzionamento ondulatori
- Rendimento ondulatori (calcolato)

Altri canali:

- Tensione della batteria dei dataloggers
- Temperatura interna dei dataloggers

Valori su uscite analogiche per indicazione su pannello illustrativo (output):

- Irraggiamento sul piano dei moduli
- Temperatura dell'aria e dei moduli
- Potenza totale DC e AC
- Rendimento del campo fotovoltaico e rendimento dell'ondulatore
- Tensione DC

Per ogni canale:

- Tempo di misura: ogni 15 secondi
- Memorizzazione: ogni ora, in continuo, con medie orarie
- Autonomia sistema: 21 giorni

2.1.2. Monitoraggio delle stringhe¹

Scopo delle misure: nel 1994 fu osservata una diminuzione del rendimento del campo. Nel 1995 vennero sostituiti dal fabbricante 177 moduli su 864, in quanto mostravano un FF < 58%. Nel 1996 vennero identificati altri moduli con un basso rendimento e nel maggio del 1998 il fabbricante accettò di sostituire tutti i 687 moduli rimanenti. Dopo la sostituzione completa dei moduli, fu effettuato un monitoraggio intensivo delle singole stringhe. Visto la serie di problemi legati all'affidabilità dei moduli, si è voluto proseguire questo monitoraggio di dettaglio per almeno 3 anni (progetto BfE n° 43907).

Lo scopo di questo sistema è di acquisire i dati di funzionamento di tutte le stringhe in modo da sorvegliarle singolarmente.

Descrizione del sistema di acquisizione: il sistema di acquisizione secondario è composto da 6 datalogger Cambell CR10 (situati rispettivamente nei 6 armadietti (box) disposti lungo l'impianto), collegati tra di loro tramite un cavo coassiale e delle interfacce (MD9 Multidrop). Ogni box è allestito in modo da permettere il monitoraggio di 8 stringhe ciascuno (totale 48 stringhe). Nota: 2 box (16 stringhe) sono cablati su 1 ondulatore.

Descrizione delle misure: i valori misurati sono riportati in dettaglio qui di seguito:

- Stringhe totali misurate: 48 (6 box, 8 stringhe per box)
- Valore misurato per ogni stringa: corrente DC (valori medi orari, minimi e massimi)
- Altri valori: per ogni datalogger, temperatura interna e tensione della batteria.
- Tempo di misura: ogni 15 secondi
- Memorizzazione: ogni ora, dalle 05:00 alle 22:00, medie orarie
- Autonomia sistema: 97 giorni

¹ Stringa = serie di moduli fotovoltaici

2.1.3. Software e trasmissione dei dati

Grazie ad un apposito software è possibile collegarsi, via modem, a ognuno dei 7 dataloggers del sistema d'acquisizione (vedi Figura 2), visualizzare i dati di funzionamento on-line e scaricarli sul computer locale (vedi Figura 3). È inoltre possibile, se necessario, riprogrammare i dataloggers direttamente dagli uffici del LEEE.

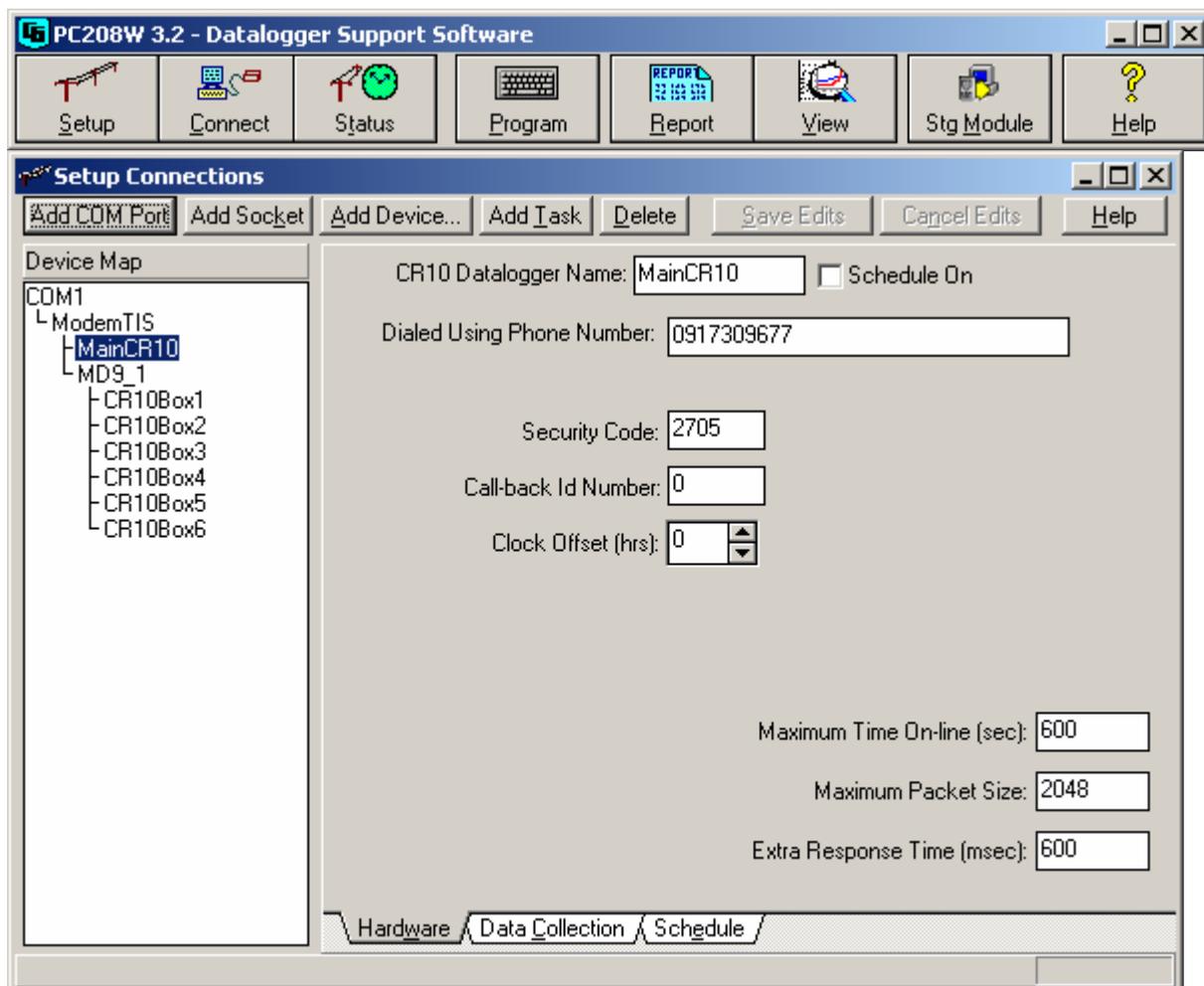


Figura 2: Software PC208W per la comunicazione con il sistema di acquisizione: “device map” per il collegamento.

| MainCR10 | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| Go | 0.13184 | Idc1 | 7.6092 | Uac_L1 | 389.81 | Pdc1 | 3.9383 |
| Gi_est | 0.14428 | Idc2 | 6.4277 | Uac_L2 | 392.76 | Pdc2 | 3.3341 |
| Gi_ovest | 0.14039 | Idc3 | 6.5024 | Uac_L3 | 393.67 | Pdc3 | 3.5083 |
| Ta | 21.994 | Udc1 | 517.57 | Iac_L1 | 13.482 | Pdc_tot | 10.781 |
| Tbom | 25.828 | Udc2 | 518.71 | Iac_L2 | 15.944 | Edc_calc1 | 0.04496 |
| Tref | 27.756 | Udc3 | 539.54 | Iac_L3 | 14.427 | Edc_p | 0.00000 |
| Iref | 0.50735 | | | | | Eac_p | 0.04200 |
| | | Idc_med | 6.8464 | Sh | 100.00 | Pac_calc | 9.9265 |
| T_CR10 | 27.733 | Udc_med | 525.27 | Funz_Arr | 100.00 | Pac_out | 10.032 |
| U_batt | 13.690 | | | Funz_Inv | 100.00 | PR_dc | 0.73236 |
| Gi_med | 0.14234 | | | | | PR_ac | 0.68153 |
| Hi_med_p | 0.00000 | Terra | 0.00000 | Gi_funz | 0.14234 | | |
| Ho_p | 0.00057 | Terra_s | 0.00000 | Pdc_tot_f | 10.781 | nArr | 7.8710 |
| HiEst_p | 0.00000 | Terra_d | 0.00000 | Eac_p_fun | 0.04200 | nInv | 93.060 |
| HiOvest_p | 0.00000 | | | TbomxGi_f | 3.6763 | kWh_cum | 164.19 |

Col-1 -- Col-4 15:33:28 Delete Add Setup

| MainCR10 - CR10 Datalogger Connection | | |
|---|--|---|
| Station List MainCR10 CR10Box1 CR10Box2 CR10Box3 CR10Box4 CR10Box5 CR10Box6 <input type="checkbox"/> Sort Alphabetically | Manual Data Collection % Collected <input type="text" value="19%"/> Monitor 2180 of 11400 <input checked="" type="checkbox"/> Prompt for data file name <input type="button" value="Collect"/> <input type="button" value="Collect All"/> <input type="button" value="Stop"/> <input type="button" value="Advanced"/> | Clock Synchronization PC System Date/Time <input type="text" value="07/10/04 16:32:39"/> Datalogger Date/Time <input type="text" value="07/10/04 15:34:58"/> <input type="checkbox"/> Pause Clk Update <input type="button" value="Set Datalogger Clk"/> |
| Data Display Graphs <input type="button" value="1"/> <input type="button" value="2"/> <input type="button" value="3"/> <input type="button" value="Numeric"/> <input type="checkbox"/> Pause Both Elapsed Time <input type="text" value="0 - 00:01:42"/> | Datalogger Program DLD file transfer progress <input type="text" value=""/> <input type="button" value="Send"/> <input type="button" value="Retrieve"/> <input type="button" value="Associate DLD Program"/> <input type="button" value="Remove Association"/> Associated Program File Name <input type="text" value="C:\AETIII\1\PROGR\1\PRINCI\1\MAG17.DLD"/> | <input type="button" value="Ports / Flags"/> <input type="button" value="Close Session"/> <input type="button" value="Disconnect"/> |
| <input type="button" value="Tools"/> <input type="button" value="Terminal"/> | | |

Figura 3: Software PC208W per la comunicazione con il sistema di acquisizione: visualizzazione dati on-line e scaricamento dati su PC locale.

2.2. Il formato dati IEA

La progettazione del sistema di acquisizione, rispettivamente l'analisi dei dati è stata effettuata conformemente alle norme Europee "Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants: Document A, *Photovoltaic System Monitoring*; Document B, *Analysis and Presentation of Monitoring Data*", JRC-ESTI. In particolare i dati di funzionamento sono elaborati e presentati nel formato richiesto dalla banca dati IEA PVPS Task2 in modo da poterli confrontare sia con quelli degli scorsi anni, sia con quelli di numerosi altri impianti nel mondo catalogati nella banca dati. A questo scopo i dati sono trasmessi, regolarmente una volta all'anno (una stringa di dati al mese e una annuale, vedi Figura 4), al responsabile che si occupa della raccolta dati a livello europeo.

Il formato dei dati² utilizzato - e richiesto dalla banca dati dell'IEA - è riportato qua di seguito.

² Da notare che questo formato introduce una condizione di funzionamento arbitraria denominata "by operation" (ossia con irraggiamento superiore a 80 W/m² e potenza del campo superiore al 5% della potenza nominale) sulla quale viene posto un accento particolare: alcuni parametri devono essere calcolati sia in condizioni "normali" che in questa condizione (vedi Figura 5). Particolarmente interessante è il valore n° 41 "Modul temperature by operation": si tratta della temperatura media dei moduli, calcolata secondo una media ponderata dove il peso attribuito al dato orario è proporzionale all'irraggiamento. La temperatura media risultante darà quindi maggior importanza agli istanti caratterizzati dalla maggior produzione.

| | N° | Descrizione italiano | Descrizione inglese | Label | Unità |
|----|----|---------------------------------------|--|--------|-----------------------|
| * | 1 | Breve nome installazione | Shortname | Name | ttttttt |
| * | 2 | Numero ID impianto | ID | ID | nnn |
| * | 3 | Po @ STC dell'impianto | Nominal power @ STC | Po | [kWp] |
| * | 4 | Superficie moduli | Modules surface | Aa | [m ²] |
| * | 5 | Anno | Year | Y | yyyy |
| * | 6 | Mese (periodo) | Period | P | mm |
| * | 7 | Periodo di riferimento (h mese) | Reporting period (one month) | t | [h] |
| | 8 | Tempo tot. (mese) monitoraggio | Total time of monitoring | tM | [h] |
| * | 9 | Frazione monitoraggio | Monitoring fraction | M | [-] |
| | 10 | Ore di sole | Sun time | Sh | [h] |
| | 11 | Funzionamento array | Availability array | OParr | [h] |
| | 12 | Non disponibilità | Non-availability to load | tnav | [h] |
| * | 13 | Frazione non disponibilità | Outage fraction | O | [-] |
| * | 14 | Funzionamento inverter | Availability inverter | OPinv | [h] |
| * | 15 | Insolazione tot. orizzontale | Total irradiation, orizontal | H | [kWh/m ²] |
| * | 16 | Insolazione tot. piano moduli | Total irradiation, array plane | HI | [kWh/m ²] |
| * | 17 | Insolazione tot. diretto | Total irradiation, beam | Hd | [kWh/m ²] |
| | 18 | Insolaz. tot. sul campo | Tot. solar energy on array plane | Esa | [kWh] |
| * | 19 | Temperatura ambiente | Ambient temperature | Tam | [°C] |
| * | 20 | Energia dal campo (dc) | Array output energy (dc) | Ea | [kWh] |
| | 21 | Energia dall'inverter | Energy from inverter (AC) (EIO+) | EIO+ | [kWh] |
| | 22 | Energia consumata dall'inverter | Inverter consumption (EIO-) | EIO- | [kWh] |
| * | 23 | Energie Inverter | Net energy from inverter (ac) | EIO | [kWh] |
| * | 24 | Energia generatore ausiliario | Auxiliary generator energy | Ebuac | [kWh] |
| * | 25 | Consumo edificio | Building consumption | Eiac | [kWh] |
| * | 26 | Energia in rete | Energy in the grid | Etu | [kWh] |
| * | 27 | Energia dalla rete | Energy from the grid | Efu | [kWh] |
| | 28 | Energia monit. + consumo baracca | Monitoring and help energy | Em | [kWh] |
| * | 29 | Indice riferimento piano orizz. | Reference Yield, global | Yr,g | [kWh/(kWp*d)] |
| * | 30 | Indice riferimento piano moduli | Reference Yield, in-plane | Yr | [kWh/(kWp*d)] |
| * | 31 | Indice funzionamento array | Array Yield | Ya | [kWh/(kWp*d)] |
| * | 32 | Indice funzionamento impianto | Final Yield | Yf | [kWh/(kWp*d)] |
| | 33 | Perdite di conversione | System Losses (Ls) | Ls | [kWh/(kWp*d)] |
| | 34 | Perdite di assorbimento | Array Capture Losses (Lc) | Lc | [kWh/(kWp*d)] |
| | 35 | Performance Ratio | Performance Ratio | PR | [-] |
| | 36 | Rendimento array | Array efficiency | narr | [-] |
| | 37 | Rendimento inverter | Inverter efficiency | ninv | [-] |
| | 38 | Rendimento totale | Overall PV plant efficiency | ntot | [-] |
| | 39 | Disponibilità inverter | Availability inverter | Betr | [%] |
| | 40 | Disponibilità campo | Availability array | Feld | [%] |
| ** | 41 | Temp. moduli durante funzionam. | Modul temperature by operation | Tp | [°C] |
| ** | 42 | Insolaz. tot. sul campo durante funz. | Tot. irradiation on array plane by op. | Esa,b | [kWh] |
| ** | 43 | Energia campo (dc) durante funz. | Array output energy (dc) by operat. | Ea,b | [kWh] |
| ** | 44 | Energia dall'inverter durante funz. | Energy from inverter (ac) by operat. | EIO,b | [kWh] |
| ** | 45 | Rendimento array durante funz. | Array efficiency by operation | narr,b | [%] |
| ** | 46 | Rendimento inverter durante funz. | Inverter efficiency by operation | ninv,b | [%] |
| ** | 47 | Rendimento totale durante funz. | Overall PV plant efficiency by operat. | ntot,b | [%] |
| * | 48 | N° giorni (dati misurati) | Number of measured days | nt | d |

** Con indice b (Betrieb / funzionamento) vengono considerati per il calcolo solo i valori quando l'impianto è in funzione

* I valori in grassetto sono necessari per la banca dati IEA

Formato dati: ASCII, separati da tabulatori

13 linee dati per anno, 12 mesi + 1 linea annuale

Figura 4: Formato dei dati misurati, richiesto dalla banca dati IEA PVPS Task2. Questi 48 valori corrispondono ad una "linea dati" di valutazione mensile.

| N° | Descrizione inglese | Label | Formula | Condizione / osservazione |
|----|--|--------|---|---------------------------------|
| 1 | Shortname | Name | | |
| 2 | ID | ID | | |
| 3 | Nominal power @ STC | Po | | |
| 4 | Modules surface | Aa | | |
| 5 | Year | Y | | |
| 6 | Period | P | | |
| 7 | Reporting period (one month) | t | Ore del mese | Secondo calendario |
| 8 | Total time of monitoring | tM | N° misure complete | Ore per mese |
| 9 | Monitoring fraction | M | $t M / t$ | |
| 10 | Sun time | Sh | N° valori orari di G I | $G I > 0.08$ |
| 11 | Availability array | OParr | N° di valori orari di P A | $G I > 0.08$ e $P A > 0.05 P 0$ |
| 12 | Non-availability to load | tnav | $Sh - Betr A^*$ | |
| 13 | Outage fraction | O | $t NAV / Sh$ | |
| 14 | Availability inverter | OPinv | N° di valori orari di P IO+ | $P IO+ > 0$ |
| 15 | Total irradiation, orizzontal | H | Somma G | |
| 16 | Total irradiation, array plane | HI | Somma G I | |
| 17 | Total irradiation, beam | Hd | Somma Gd | |
| 18 | Tot. solar energy on array plane | Esa | $H I * AA$ | |
| 19 | Ambient temperature | Tam | Valore medio T am | Calcolato su 24 ore |
| 20 | Array output energy (dc) | Ea | Somma P A | |
| 21 | Energy from inverter (AC) (EIO+) | EIO+ | Somma P IO+ | |
| 22 | Inverter consumption (EIO-) | EIO- | Somma P IO- | |
| 23 | Net energy from inverter (ac) | EIO | $(E IO+) - (E IO-)$ | |
| 24 | Auxiliary generator energy | Ebuac | Somma P BUac | |
| 25 | Building consumption | Eiac | Somma P Iac | |
| 26 | Energy in the grid | Etu | Somma P TU | |
| 27 | Energy from the grid | Efu | Somma P FU | |
| 28 | Monitoring and help energy | Em | Somma P M | |
| 29 | Reference Yield, global | Yr,g | Media giornaliera di G | |
| 30 | Reference Yield, in-plane | Yr | Media giornaliera di G I | |
| 31 | Array Yield | Ya | $(Media\ giornaliera\ di\ P\ A) / P 0$ | |
| 32 | Final Yield | Yf | $(Media\ giornaliera\ di\ P\ IO) / P 0$ | |
| 33 | System Losses (Ls) | Ls | $Y A - Y f$ | |
| 34 | Array Capture Losses (Lc) | Lc | $Y r - Y A$ | |
| 35 | Performance Ratio | PR | $Y f / Y r$ | |
| 36 | Array efficiency | narr | $E A / E S,A$ | |
| 37 | Inverter efficiency | ninv | $E IO / E A$ | |
| 38 | Overall PV plant efficiency | ntot | $E IO / E S,A$ | |
| 39 | Availability inverter | Betr | $(Betr A^* / Sh) * 100$ | |
| 40 | Availability array | Feld | Collegamento stringhe in % | |
| 41 | Modul temperature by operation | Tp | $(Somma(Tp * G I)) / H I,b$ | $G I > 0.08$ e $P A > 0.05 P 0$ |
| 42 | Tot. irradiation on array plane by op. | Esa,b | Somma E S,A | $G I > 0.08$ e $P A > 0.05 P 0$ |
| 43 | Array output energy (dc) by operat. | Ea,b | Somma E A | $G I > 0.08$ e $P A > 0.05 P 0$ |
| 44 | Energy from inverter (ac) by operat. | EIO,b | Somma E IO+ | $G I > 0.08$ e $P A > 0.05 P 0$ |
| 45 | Array efficiency by operation | narr,b | $E A,b / E S,A,b$ | |
| 46 | Inverter efficiency by operation | ninv,b | $E IO+,b / E A,b$ | |
| 47 | Overall PV plant efficiency by operat. | ntot,b | $E IO+,b / E S,A,b$ | |
| 48 | Number of measured days | nt | | |

Nota:

- Il valore n° 17 dev'essere fornito solo per le installazioni con concentratore ottico
- Per il valore n° 26, nelle installazioni collegate alla rete $Etu = Eio$
- Il valore n° 41 è la media ponderata di Tp
- I valori dal n° 41 al n° 47 sono calcolati solo quando l'impianto è in funzione, cioè quando $G I > 0.08$ e $P A > 0.05 P 0$ (ossia con irraggiamento superiore a 80 W/m² e potenza del campo superiore al 5% della potenza nominale).

Figura 5: Formato dati IEA PVPS Task2: formule e condizioni di calcolo.

3. Misure in continuo

Le misure in continuo fanno capo al sistema d'acquisizione dati descritto al capitolo 2, che memorizza in modo automatico 133 valori ogni ora (media oraria), sulla base di misure effettuate ogni 15 secondi. 54 dati si riferiscono all'impianto, gli altri 79 alle stringhe: essi sono trattati ai capitoli 3.1, rispettivamente 3.2.

3.1. Monitoraggio principale dell'impianto

Il monitoraggio di base permette di verificare il buon funzionamento dell'impianto a seguito dei lavori di risanamento. Lo scopo di questo sistema è di acquisire i dati meteo e i dati di funzionamento globali dell'impianto. A partire da questi dati è in particolare possibile determinare la resa energetica dell'impianto in termini di indici di produzione (Y_f) e di Performance Ratio (PR), e di confrontare questi parametri con quelli degli altri impianti collegati alla rete in Ticino.

3.1.1. Comportamento in temperatura : coefficienti α , β , e k

Rappresentando tensione, corrente e potenza dc in funzione della temperatura delle celle su dei grafici a dispersione, è stato possibile ricavare i rispettivi coefficienti di temperatura β , α , k dell'impianto AETIII in condizioni reali di funzionamento.

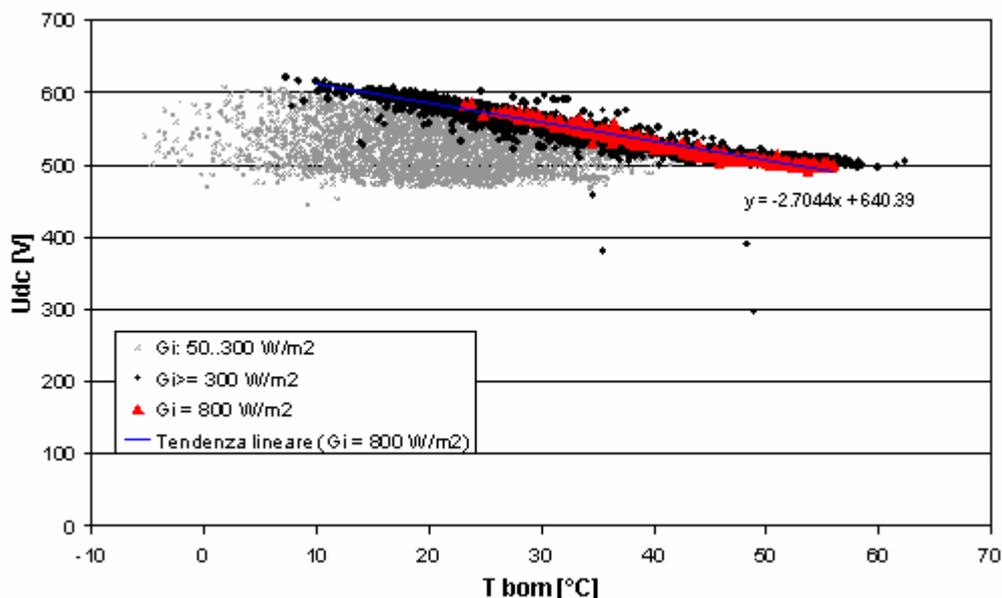


Figura 6: Tensione dc - media dei 3 campi - in funzione della temperatura delle celle: $U_{dc} = f(T_{bom})$. Valori medi orari, a diversi irraggiamenti.

Coefficiente³ β' (Figura 6):

Già a partire da 300 W/m^2 i valori della tensione dc (vedi Figura 6) sono allineati. Per $G=800\text{W/m}^2$ (punti rossi) è possibile ricavare, dalla pendenza della retta, il coefficiente di temperatura della tensione $\beta' = \frac{\Delta U_{dc}}{\Delta T_{bom}}$. Questo valore, riferito a V_m , è negativo e si avvicina al coefficiente tipico dei moduli cristallini. Più precisamente vale (72 celle/modulo; 18 moduli/stringa):

$$\beta'_{\text{mis.}} = \frac{-2.7044 \text{ V}}{^\circ\text{C} \cdot \text{stringa}} = \frac{-0.15024 \text{ V}}{^\circ\text{C} \cdot \text{modulo}} = \frac{-2.0867 \text{ mV}}{^\circ\text{C} \cdot \text{cella}}$$

A titolo di confronto, il coefficiente β utilizzato per la correzione delle curve I-V @ STC (vedi capitolo 4.3) e fornito dal fabbricante vale:

$$\beta_{\text{fab.}} = \frac{-2.628 \text{ V}}{^\circ\text{C} \cdot \text{stringa}} = \frac{-0.146 \text{ V}}{^\circ\text{C} \cdot \text{modulo}} = \frac{-2.0277 \text{ mV}}{^\circ\text{C} \cdot \text{cella}}$$

Coefficiente⁴ α' (Figura 7):

La Figura 7 mostra la corrente in relazione alla temperatura, a diversi irraggiamenti. A differenza della tensione (vedi Figura 6) si nota come la corrente sia correlata con l'irraggiamento, oltre che con la temperatura. Dalla pendenza della linea di tendenza lineare tracciata a 800W/m^2 (punti rossi) è possibile ricavare il coefficiente di temperatura della corrente $\alpha' = \frac{\Delta I_{dc}}{\Delta T_{bom}}$ leggermente positivo come ci si attende. Il coefficiente α' misurato sull'intero campo è di $+0.042 \text{ A/}^\circ\text{C}$. Come si poteva prevedere, la dispersione dei valori di $I_{dc}=f(T)$ è elevata.

Coefficiente k (Figura 8):

La potenza, a vari irraggiamenti, in funzione della temperatura è riportata in Figura 8, dalla quale emerge subito un massimo: la potenza dc massima raggiunta a $1'000 \text{ W/m}^2$ è di 81.5 kW (punti blu).

Dalla pendenza della linea di tendenza lineare tracciata a 800W/m^2 (punti rossi) è inoltre possibile ricavare il coefficiente di temperatura della potenza $k = \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta T_{bom}} \left[\frac{\text{kW}}{^\circ\text{C}} \right]$ o $\left[\frac{\%}{^\circ\text{C}} \right]$ dell'impianto AET III. Più precisamente, a 800 W/m^2 si ha:

$$k = \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta T_{bom}} = \frac{-0.2952 \text{ kW}}{1 \text{ }^\circ\text{C}} \text{ che corrisponde a } \mathbf{-0.47 \text{ }^\circ\text{C}} \text{ (considerato che la potenza media a } 800\text{W/m}^2 \text{ è di } 62.34 \text{ kW}).$$

Questo valore, che "racchiude" gli effetti di α e di β , è importante per stimare le perdite di potenza dovute al surriscaldamento dei moduli e per la correzione @ STC della curva IV. Ricordiamo che il valore tipico di k per i moduli al silicio cristallino è di $-0.4\% / ^\circ\text{C}$.

Globalmente i valori dei tre coefficienti di temperatura rilevati coincidono con i coefficienti teorici dati dai fabbricanti.

³ β' è definito come il coefficiente di temperatura riferito a V_m , mentre β è riferito a V_{oc}

⁴ α' è definito come il coefficiente di temperatura riferito a I_m , mentre α è riferito a I_{sc}

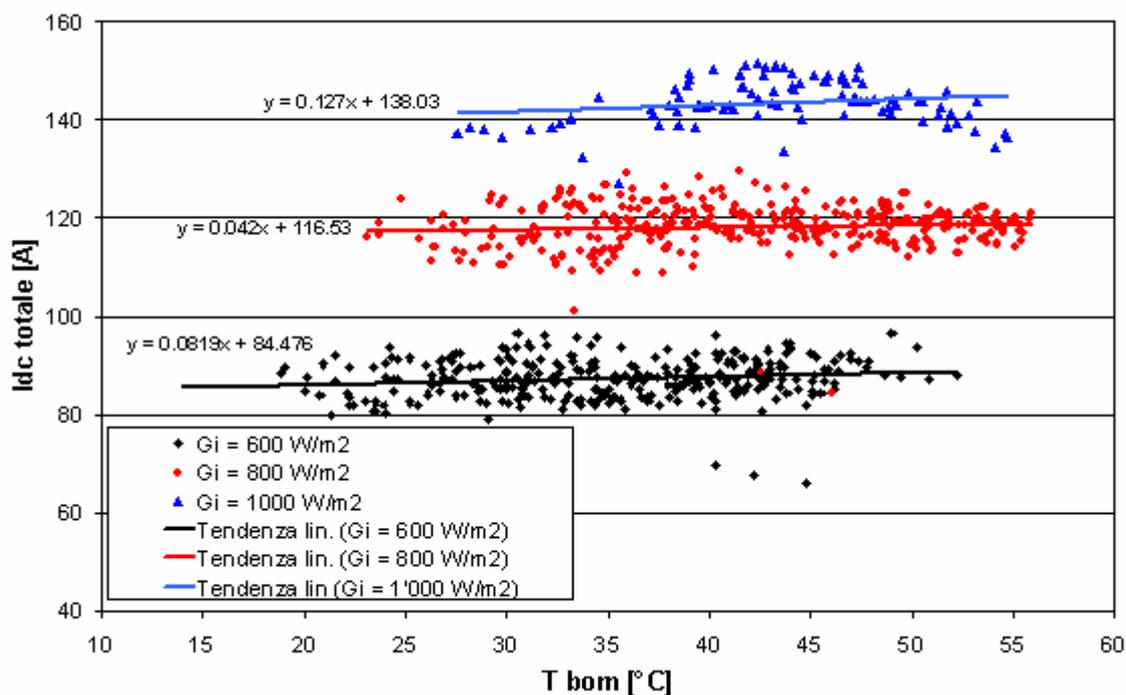


Figura 7: Corrente dc totale dei 3 campi in funzione della temperatura delle celle: $I_{dc} = f(T_{bom})$. Valori medi orari, a diversi irraggiamenti.

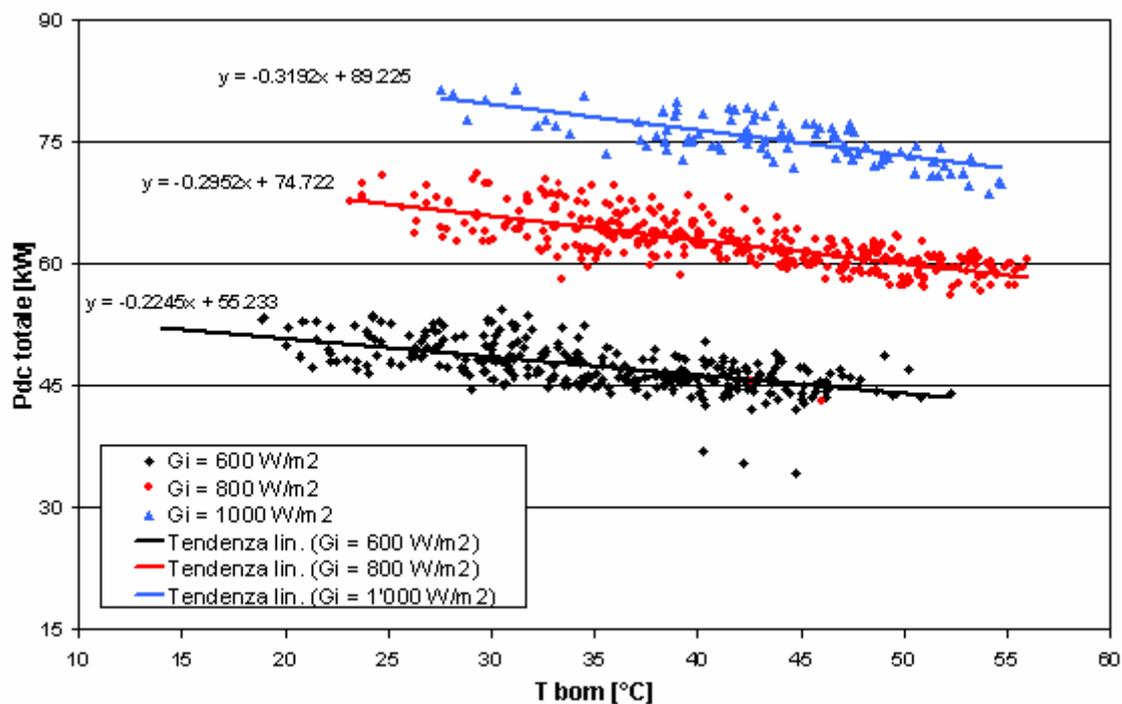


Figura 8: Potenza dc totale dei 3 campi in funzione della temperatura delle celle: $P_{dc} = f(T_{bom})$. Valori medi orari, a diversi irraggiamenti.

3.1.2. Potenza: valori di punta, a 25°C, frequenze e matrici

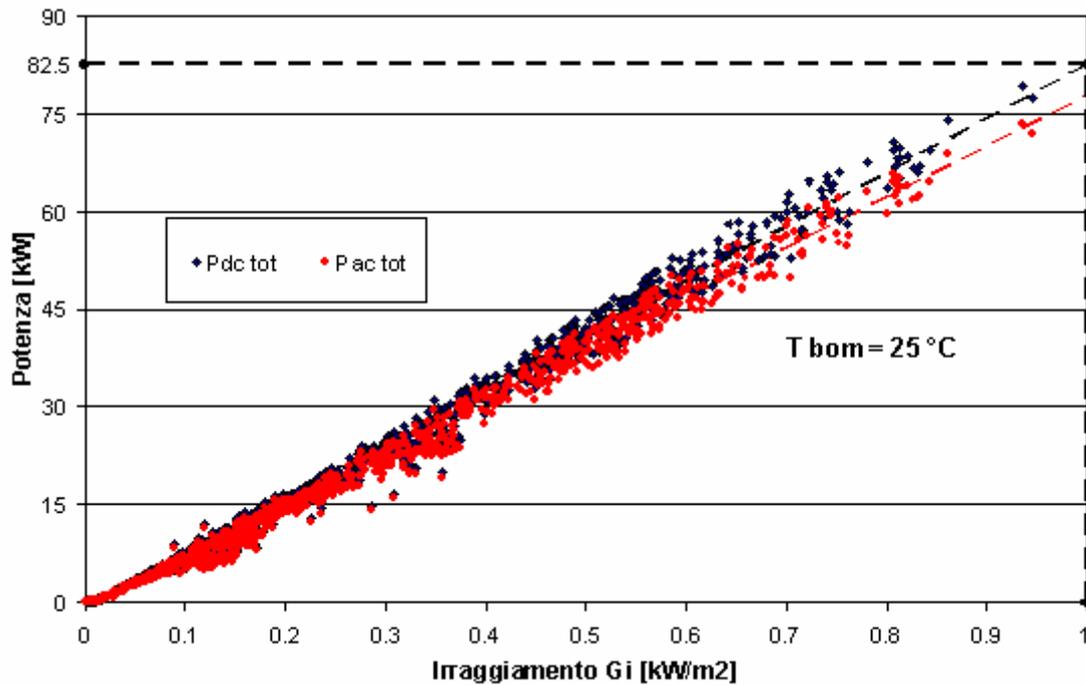


Figura 9: Potenza totale dc e ac a 25°C, in funzione dell'irraggiamento: $P_{@ 25^{\circ}\text{C}} = f(G)$. Estrapolazione dei valori a 1'000 W/m².

La Figura 9 mostra i valori della potenza totale ac e dc dell'impianto AET III, misurati a 25°C. Il rapporto tra i valori ac e i corrispondenti valori dc equivale al rendimento degli ondulatori. Estrapolando i dati misurati si ricava un'approssimazione del valore teorico delle potenze @ STC (1'000 W/m², 25°C) dove: $P_{dc_stc} = 82.5$ kW, rispettivamente $P_{ac_stc} = 77.8$ kW.

Utilizzando questi due valori di potenza si ottiene una prima approssimazione del rendimento degli ondulatori a 1'000 W/m², cioè $77.8/82.5 = 94.3$ %. Ciò è in linea con quanto ricavato nell'approfondimento del capitolo 3.1.4.

Il valore estrapolato di P_{dc_stc} è leggermente inferiore (-5.5%) ai valori calcolati sulle misure a STC di 26 moduli di riferimento. La differenza è dovuta alle perdite sui cavi, alle perdite di mismatch nonché alla precisione delle misure.

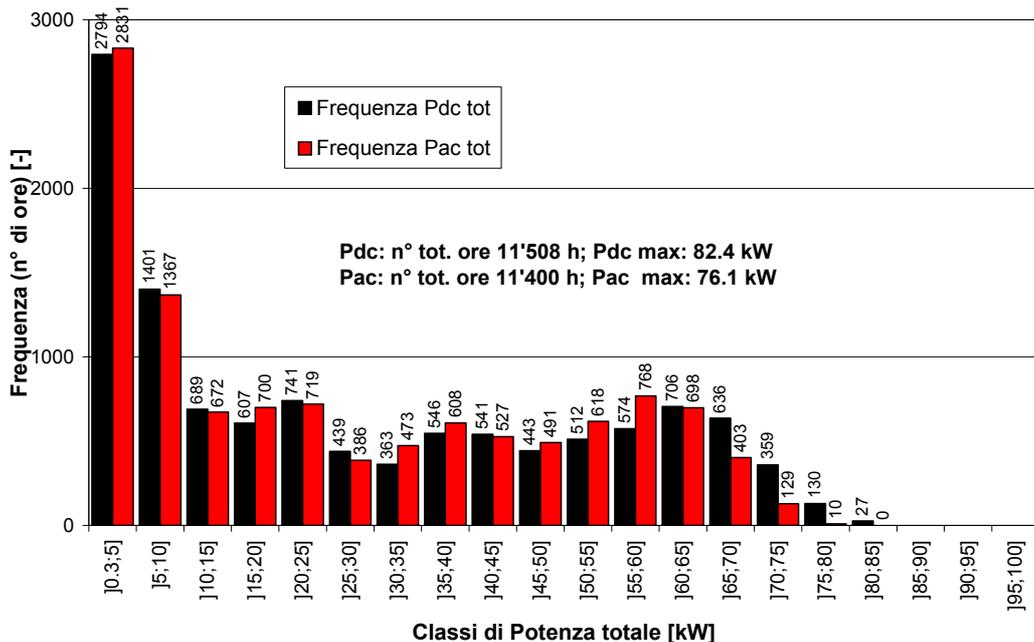


Figura 10: Frequenza della potenza (dc e ac) effettiva erogata dall'impianto, secondo classi di potenza dell'ampiezza di 5 kW. Dati medi orari.

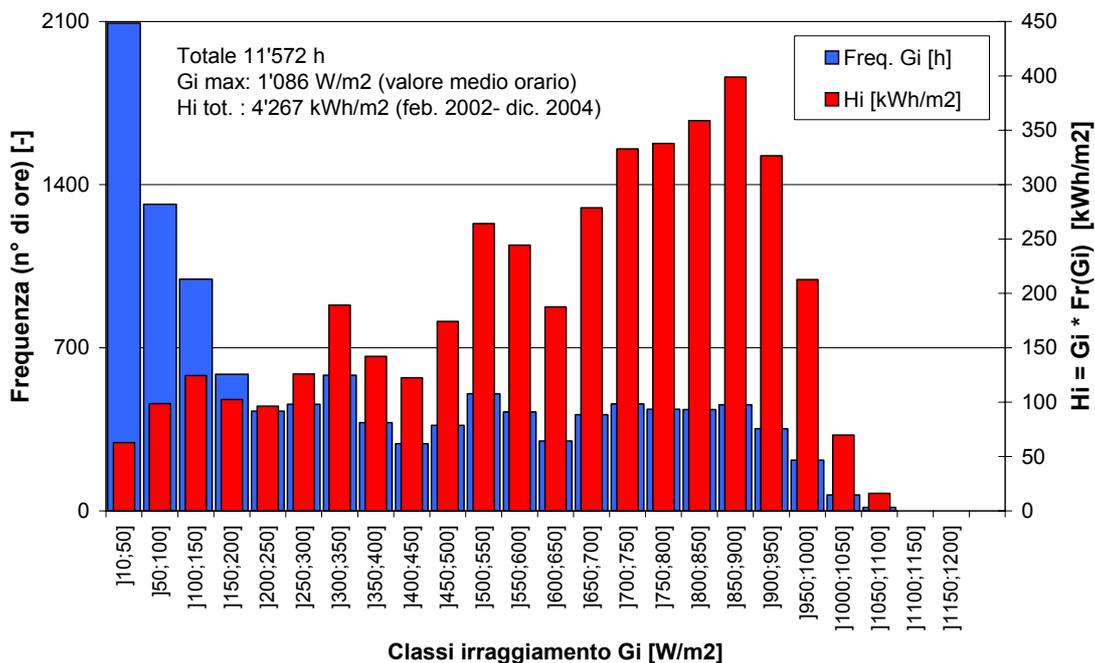


Figura 11: Ripartizione in frequenza dell'irraggiamento Gi, cioè Fr(Gi), e distribuzione dell'energia Hi ricevuta per ogni intervallo di Gi

Dalla Figura 10 è possibile determinare per quanto tempo l'impianto ha lavorato ad un determinato regime. I dati si riferiscono ad oltre 11'000 ore di funzionamento. Finora la potenza dc effettiva erogata dai moduli non ha mai superato gli 82.4 kW ed è stata compresa tra 80 e 85 kW per una piccola frazione del tempo: 27 "volte", cioè ca. lo 0.2 % del tempo. Questo significa non solo che la potenza nominale dichiarata (valore dc) di 103.42 kW non è mai stata raggiunta ma che addirittura l'impianto non ha mai superato l'80% di questo valore. In generale questa informazione è utile in fase di dimensionamento: la scelta di un ondatore dalla potenza nominale pari all'80% di quella del campo non è affatto azzardata, ma presenta 2 vantaggi: risparmio finanziario sull'ondatore; ondatore caricato in modo più efficiente. Analogamente, la potenza totale massima ac effettivamente raggiunta è stata $P_{ac,max} = 76.1\text{kW}$, che corrisponde a $76.1:3 = 25.37\text{ kW}$ per campo, valore molto vicino alla soglia in cui gli ondulatori vanno in limitazione. Ciò dimostra che gli ondulatori dell'impianto AETIII sono dimensionati correttamente.

Da notare che le potenze massime dc e ac raggiunte dall'impianto, cioè $P_{dc,max} = 82.4\text{ kW}$ rispettivamente $P_{ac,max} = 76.1\text{ kW}$, in pratica corrispondono a quelle estrapolate @ STC (vedi Figura 9) di 82.5kW, rispettivamente 77.8 kW.

La ripartizione in frequenza delle potenze segue quella dell'irraggiamento (Figura 10 e Figura 11). Gli irraggiamenti più frequenti sono quelli bassi ($< 150\text{ W/m}^2$); la maggior energia incidente H_i si ha invece tra 850 e 900 W/m^2 . In quest'intervallo si hanno 400 kWh/m^2 , che corrispondono a circa 2 volte l'energia che giunge attorno ai 500 W/m^2 , rispettivamente attorno ai 1000 W/m^2 . L'intervallo più importante, che occorrerà considerare con particolare interesse, è quindi quello attorno a 900 W/m^2 : nell'ottica di un'ottimizzazione di un impianto fotovoltaico esposto alle medesime condizioni, in questo intervallo di irraggiamento le componenti dovrebbero avere il loro massimo rendimento.

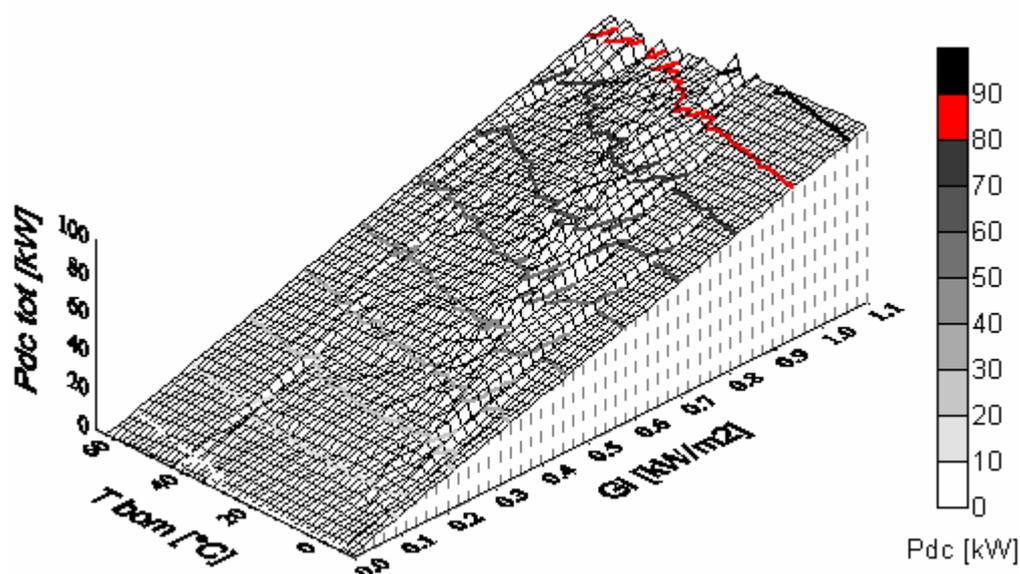


Figura 12: Matrice di potenza totale dc effettiva, in funzione dell'irraggiamento e della temperatura delle celle: $P_{dc} = f(G, T_{bom})$. Isolinee di potenza tracciate ogni 10kW, in rosso quella di 80kW. Dati medi orari.

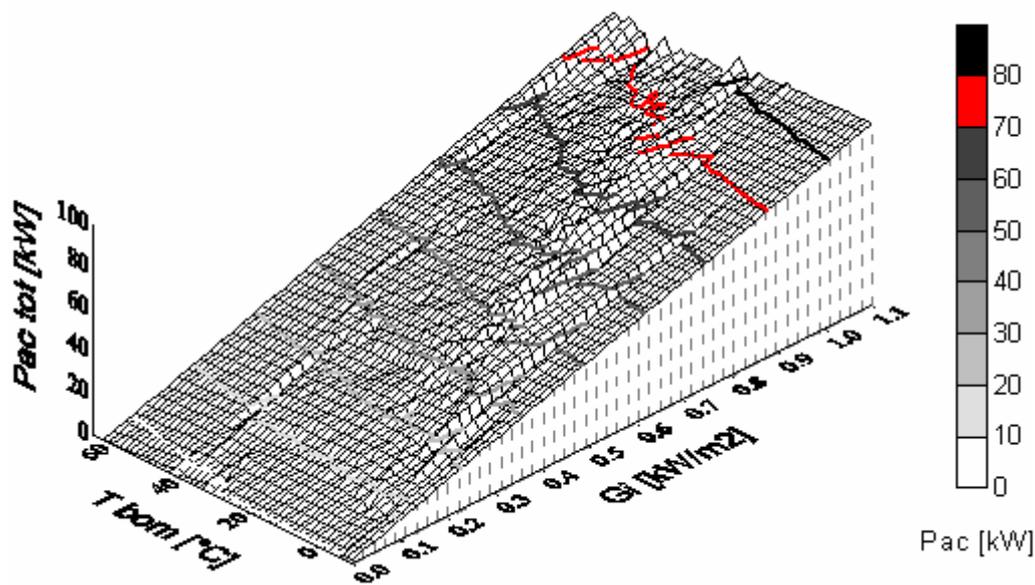


Figura 13: Matrice di potenza totale ac effettiva, in funzione dell'irraggiamento e della temperatura delle celle: $Pac=f(G,T_{bom})$. Isolinee di potenza tracciate ogni 10kW, in rosso quella di 70kW. Dati medi orari.

Dalla valutazione dei dati istantanei (ogni ora), sono state preparate anche le “matrici” di potenza $P=f(G,T_{bom})$ dell'impianto AETIII (vedi Figura 12 e Figura 13): esse permettono di stabilire come si comporta l'impianto in funzione di ogni condizione meteo registrata (G_i , T_{bom}). Mentre i dati giornalieri e mensili forniscono perlopiù indicazioni per valutazioni globali (buon funzionamento, confronto con altri impianti) e utili agli utilizzatori finali (aspetto pratico), le matrici permettono di andare a fondo e capire il perché delle differenze di comportamento a diverse condizioni di lavoro (aspetto teorico).

Le matrici di potenza permettono di stabilire come varia la potenza, qual è la potenza massima raggiunta, ecc. Nella Figura 12 e Figura 13 sono state tracciate delle isolinee di potenza ogni 10 kW: l'inclinazione delle varie isolinee permette di ricavare i coefficienti di temperatura ($\Delta P=f(\Delta T)$). Le figure mostrano che questi moduli si comportano come la maggior parte dei moduli cristallini misurati al LEEE. A bassi irraggiamenti l'effetto della temperatura sulla potenza è minimo, ossia il coefficiente di temperatura è pressoché nullo. A partire da ca. 200W/m² il coefficiente di temperatura diventa vieppiù negativo.

Si nota inoltre che a condizioni di lavoro estreme corrispondono le isolinee di potenza di 80kW (dc) (Figura 12) rispettivamente 70kW (ac) (Figura 13), potenze ben inferiori alla potenza nominale, mai raggiunta⁵.

⁵ Nel grafico sono rappresentati anche punti non misurati poiché corrispondenti a condizioni meteo mai registrate: questi punti sono stati calcolati dal modello matematico di supporto al programma di elaborazione grafica.

3.1.3. Performance Ratio (PR) e Final Yield (Yf) orari, giornalieri e mensili

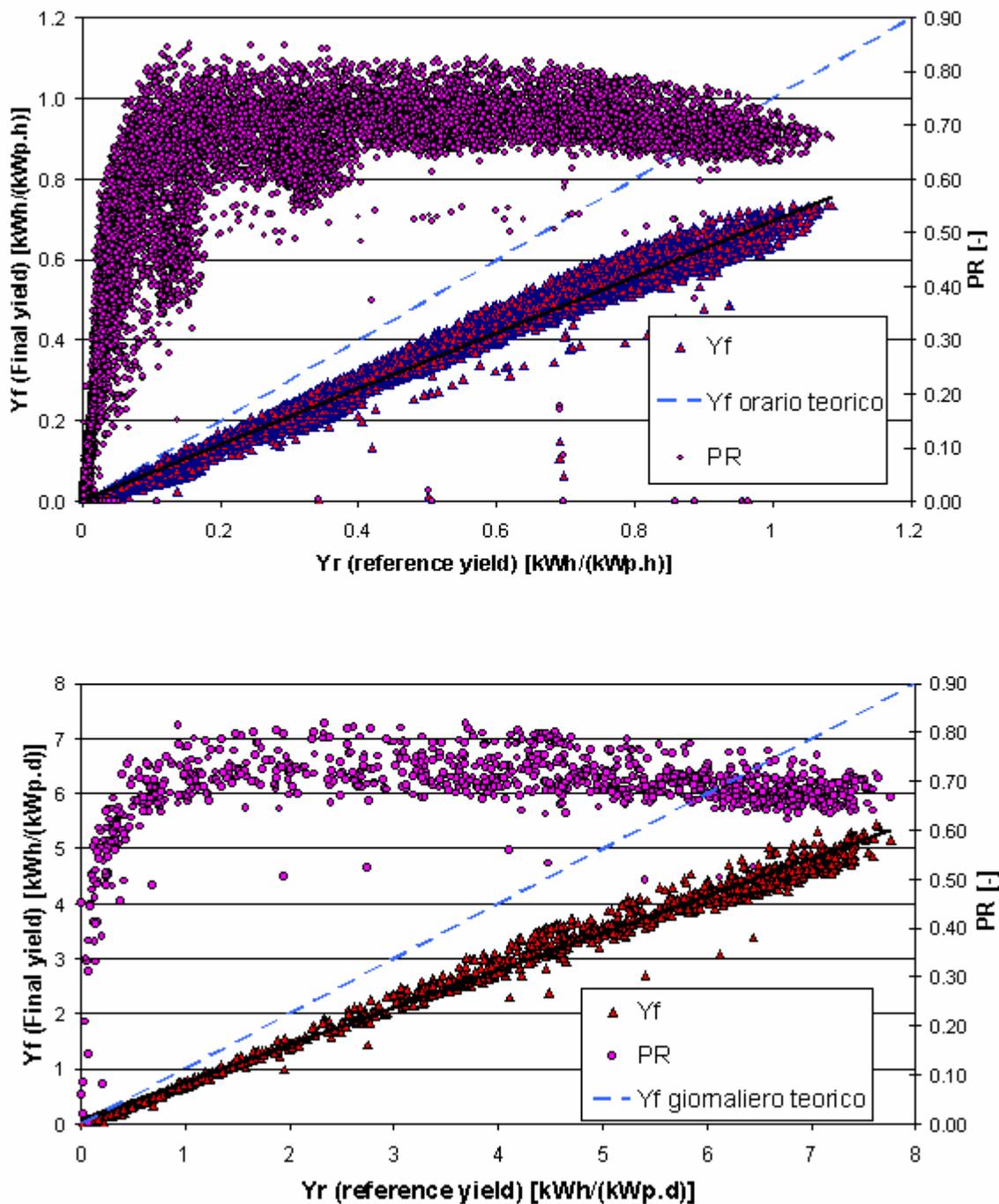


Figura 14: Impianto AET III, Y_f e PR_{ac} : dati orari (in alto) e giornalieri (in basso) dal 2002 al 2004. La diagonale tratteggiata corrisponde al caso ideale ($PR = 100\%$).

Sulla base dei dati raccolti si può affermare che l'impianto funziona correttamente.

La Figura 14 mostra che il PR dell'impianto supera il 70 % anche a bassi irraggiamenti - già a partire da 65 W/m^2 - e raggiunge il massimo attorno a $350\text{-}550 \text{ W/m}^2$. Il PR massimo orario è stato del 85.2%, quello giornaliero del 82%. Questa figura fornisce inoltre preziose informazioni sulla frequenza di determinate condizioni di lavoro dell'impianto. Ad esempio, mentre gli istanti (dati orari) in cui l'impianto lavora a bassi irraggiamenti sono numerosi, le giornate più frequenti sono quelle con un'insolazione elevata, compresa tra 4 e $8 \text{ kWh/m}^2\text{.d}$: in altri termini si hanno il 50% degli istanti con $G_i < 220 \text{ W/m}^2$ ma il 50% delle giornate con $H_i > 4.5 \text{ kWh/m}^2\text{.d}$ (vedi anche Figura 11). In queste condizioni, dove si registra la maggior produzione di energia, l'indice di produzione giornaliero (Yf) è buono: ad esempio 4.24 kWh/kWp.d con $H_i = 6 \text{ kWh/m}^2\text{.d}$, che corrisponde ad un PR del 70%.

Gli indici PR e Yf registrati sono stati buoni durante tutta la campagna di misura in questione: dalla Figura 15 si notano in particolare i valori record del PR giornaliero (80%) ottenuti durante l'inverno 2003-2004.

La Figura 16 e la Figura 17 riportano gli indici PR e Yf a partire dal 1992, ricavati cioè da tutte le misure effettuate sull'arco di 13 anni, da quando l'impianto è stato messo in funzione. Esse forniscono una visione generale che permette in particolare di confrontare il funzionamento attuale con quello misurato in passato, prima del risanamento. I dati, nella Figura 16 sono rappresentati in funzione del tempo, mentre nella Figura 17 sono messi in relazione anche con l'insolazione. Nella Figura 17 in alto si osserva il PR dell'impianto misurato prima del risanamento (fino al 1999, punti marroni), rispettivamente dopo (dal 2002 al 2004, punti rossi). È ben visibile come, a seguito del risanamento, il PR sia migliorato. Nella parte bassa della figura è rappresentato l'indice Yf: per il periodo precedente il risanamento è stata fatta una distinzione annuale, mentre a partire dal 2002 i dati sono stati rappresentati con il medesimo indicatore (triangolino rosso). Si nota in particolare come nel 1996 (cerchietti marroni) siano stati registrati indici molto bassi. Globalmente anche per il Yf valgono le stesse considerazioni fatte per il PR, ossia a partire dal 2002 vi è stato un miglioramento; inoltre è diminuita anche la dispersione dei dati ovvero è aumentata la correlazione con l'insolazione. Anche in questa figura la diagonale tratteggiata rappresenta il caso ideale, corrispondente ad un PR del 100%.

Complessivamente (vedi Figura 16 e Figura 17) il PR e il Yf sono migliori rispetto a quelli degli scorsi anni, quando l'impianto non era ancora risanato (vedi [1]): i valori attuali corrispondono a quelli che per molti anni sono stati valori di picco.

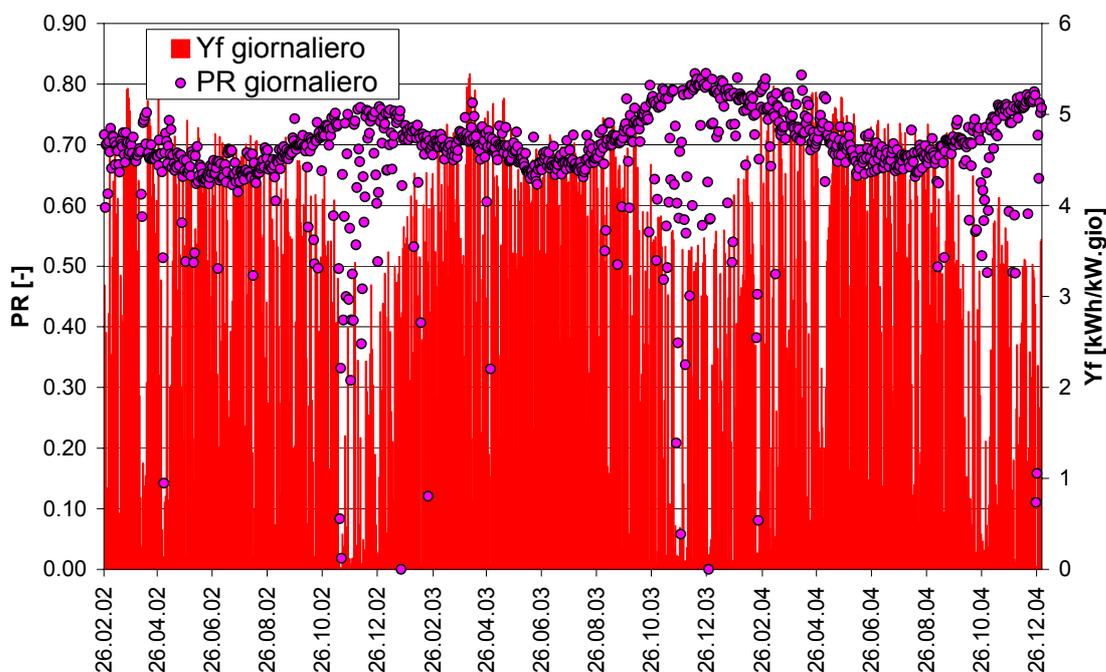


Figura 15: Impianto AET III, Yf e PRac giornalieri in funzione del tempo, dal 2002 a dicembre 2004.

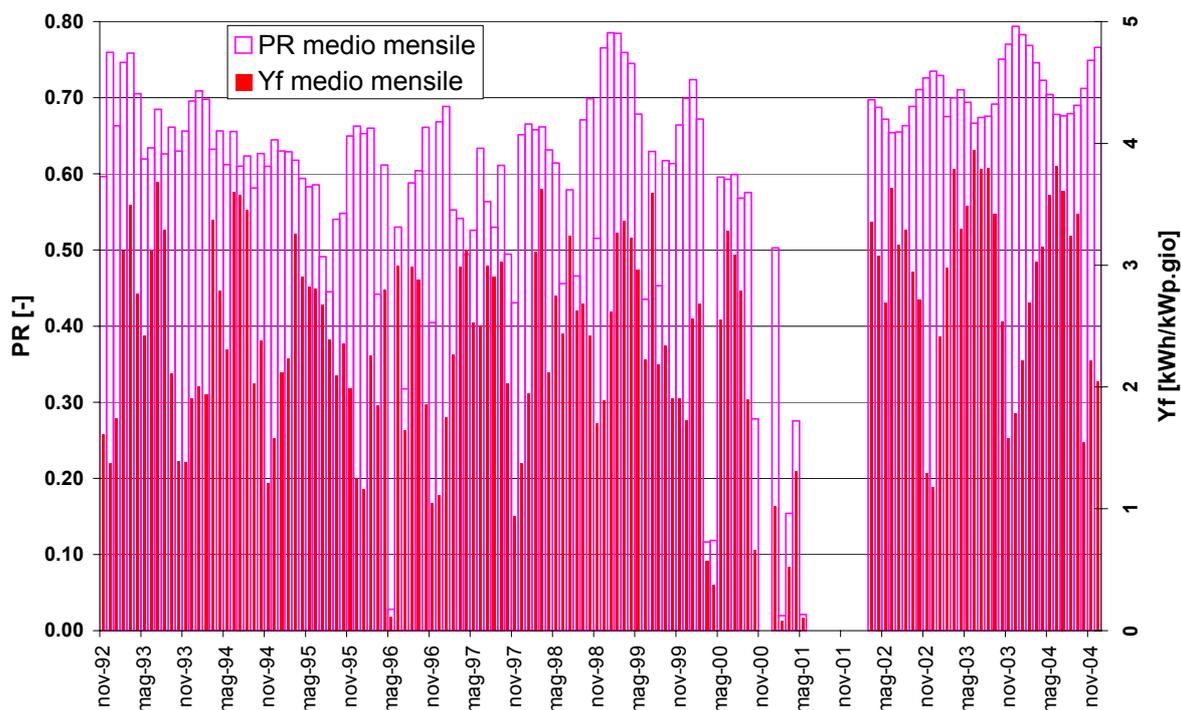


Figura 16: Impianto AET III, Yf e PRac mensili in funzione del tempo, dal 1992 a dicembre 2004 (situazione prima e dopo il risanamento)

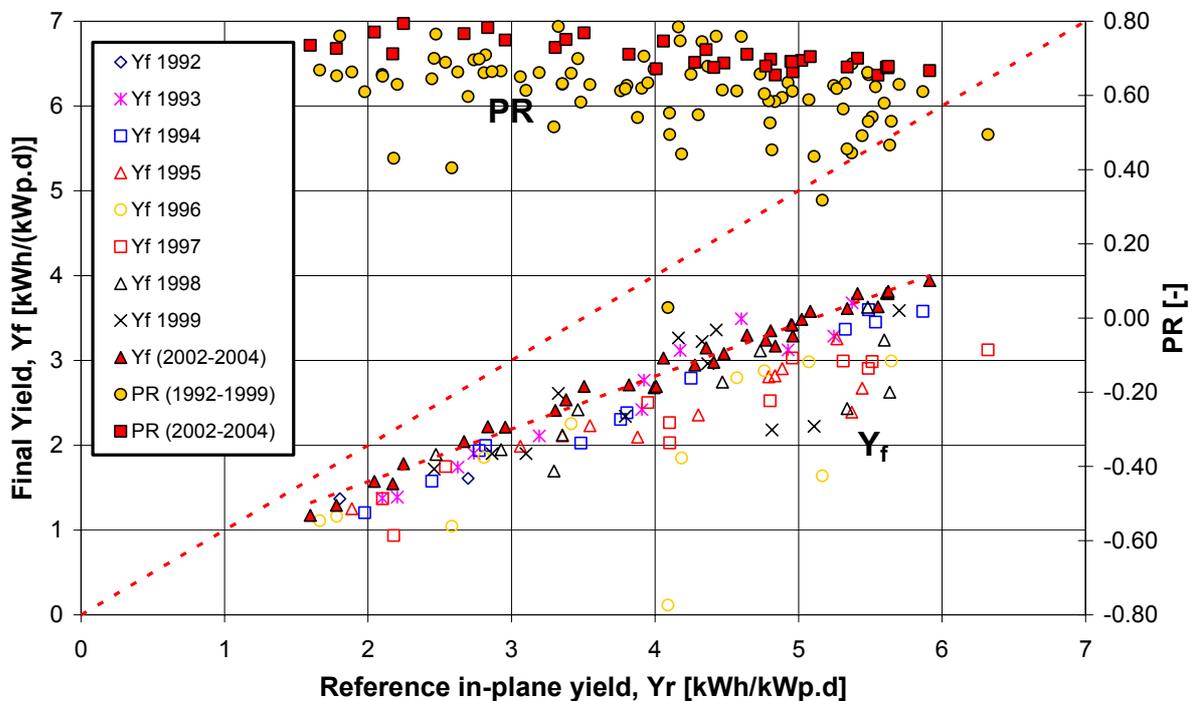


Figura 17: Impianto AET III, Yf e PRac mensili (un dato al mese) in funzione dell'insolazione e del tempo, dal 1992 al 2004: confronto tra prima (dal 1992 al 1999) e dopo (dal 2002) il risanamento

3.1.4. Comportamento degli ondulatori

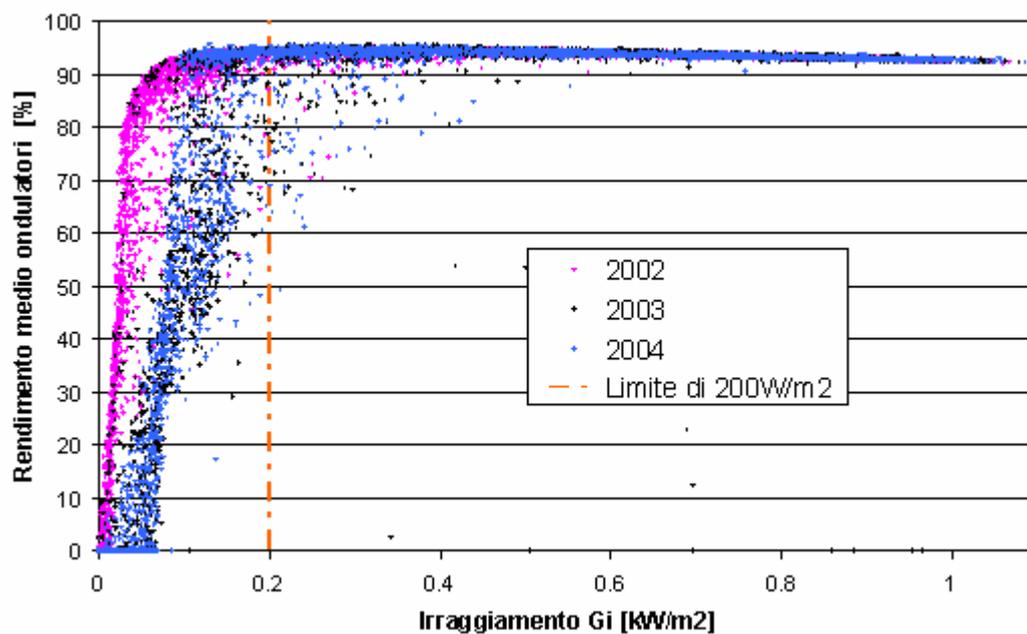


Figura 18: Rendimento medio degli ondulatori in funzione dell'irraggiamento Gi; curve tracciate per gli anni 2002, 2003, e 2004 separatamente (dati orari, media ogni 15 s)

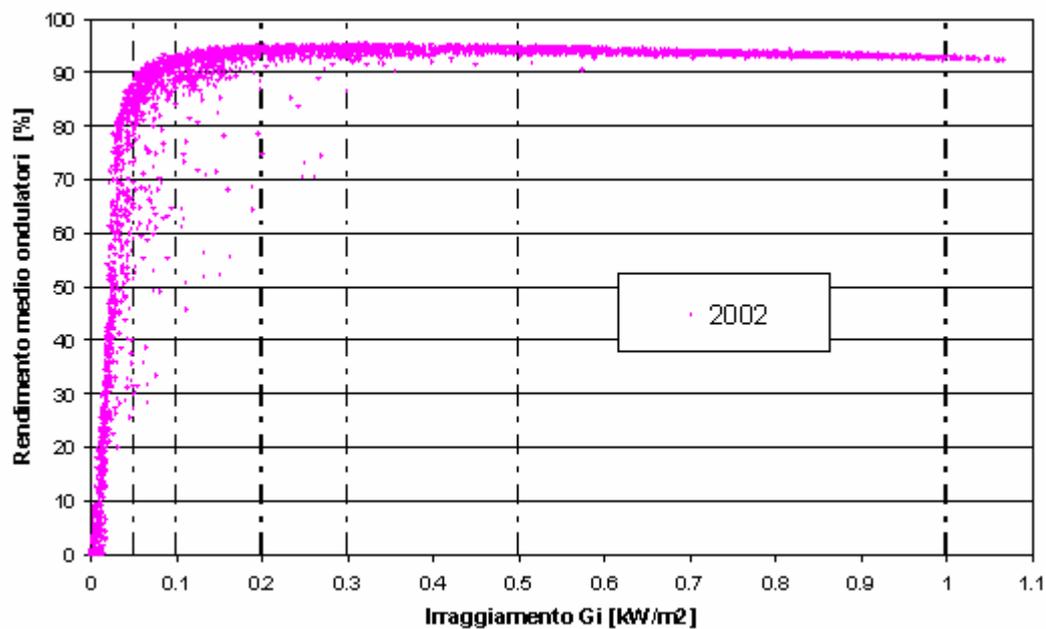


Figura 19: Rendimento medio degli ondulatori in funzione dell'irraggiamento Gi; solamente dati 2002. Le linee tratteggiate verticali servono come riferimento per calcolare il rendimento europeo ponderato.

Il rendimento degli ondulatori è elevato (vedi Figura 18) e corrisponde a quello dichiarato dal fabbricante. In particolare, a partire dai 200 W/m² il rendimento è sempre compreso tra il 92% e il 95%. I valori massimi sono raggiunti tra 300 e 500 W/m²; in questo regime il rendimento supera spesso il 95% e ha raggiunto anche il 95.6%.

Sotto la soglia dei 200 W/m² invece il rendimento dipende dal periodo in cui è stato rilevato: mentre nel 2002 era già elevato a bassissimi irraggiamenti (Figura 19), nel 2003 e 2004 a queste condizioni di lavoro gli ondulatori sono stati meno efficienti (Figura 18). Ciò potrebbe essere dovuto oltre alla sporcizia crescente dei moduli più a ovest, a errori nella misura dell'irraggiamento, a stringhe malfunzionanti, oppure a modifiche dei parametri di ricerca del punto di massima potenza degli ondulatori da parte della ditta fornitrice. Queste ipotesi sono ancora da verificare.

Se per i punti a basso irraggiamento si considera la curva del 2002 (che ha la tipica forma dichiarata dai fabbricanti, Figura 19), si ottengono valori riportati nella tabella Tabella 1, da cui si ricava il rendimento europeo⁶ ponderato degli ondulatori:

$$\eta_{EUpond} = 0.03*\eta_5 + 0.06*\eta_{10} + 0.13*\eta_{20} + 0.1*\eta_{30} + 0.48*\eta_{50} + 0.2*\eta_{100} = \mathbf{93.7 \%}$$

| Irraggiamento Gi [W/m ²] | Rendimento η [%] | Peso P [-] | Prodotto P. η |
|--|-----------------------------|------------------|-----------------------|
| 50 | 85.2 | 0.03 | 2.56 |
| 100 | 92.3 | 0.06 | 5.54 |
| 200 | 94.1 | 0.13 | 12.23 |
| 300 | 94.6 | 0.10 | 9.46 |
| 500 | 94.6 | 0.48 | 45.41 |
| 1000 | 92.6 | 0.20 | 18.52 |
| Rendimento EU ponderato (%) | | | 93.72 |

Tabella 1: Rendimento degli ondulatori (dati 2002) a irraggiamenti determinati, e rispettivi "pesi" per il calcolo del rendimento europeo ponderato. Vedi anche Figura 19

⁶ Il "rendimento europeo ponderato" degli ondulatori si calcola attribuendo un "peso" (ponderazione) diverso alle diverse condizioni di lavoro in cui è stata fatta la misura. Ad esempio il termine $0.03*\eta_5$ significa che al rendimento misurato al 5% del carico (η_5), cioè a 50 W/m², si attribuisce un'importanza di 0.03, cioè del 3%; la somma dei pesi dà il 100%. Da notare che questa definizione di rendimento (vedi Tabella 1) pone un accento particolare sul funzionamento dell'ondulatore a 500W/m²: nel calcolo della media, questa condizione di lavoro "vale" come la somma di tutte le altre.

3.1.5. Produzione di energia, PR e Yf annuali

Lo scopo di questo capitolo è di fornire una visione d'assieme circa il funzionamento dell'impianto in termini di produzione e di indici PR e Yf: questi ultimi, già trattati al capitolo 3.1.3, verranno pertanto presentati e discussi su una base temporale più ampia, mensile rispettivamente annuale. Si rimanda il lettore pure al prossimo capitolo, dove si ritrovano gli stessi indici presentati secondo il formato IEA.

Produzione giornaliera: durante una bella giornata l'impianto produce ca. 500 kWh; la produzione giornaliera massima raggiunta tra gennaio 2002 e dicembre 2004 è stata di 563 kWh (07.04.2003), mentre quella media è stata di 299 kWh.

Produzione mensile (vedi Figura 20): la produzione mensile media è stata di 9'117 kWh, quella massima di 12'177 kWh (giugno 2003).

Produzione annuale (vedi Figura 20, Figura 22, e Figura 24 colonna E IO¹): nel corso dei tre anni di monitoraggio, l'impianto ha erogato rispettivamente 95'977kWh (2002), 115'322 kWh (2003) e 108'492 kWh (2004). La produzione 2003, che supera del 20% quella del 2002, è stata eccezionalmente elevata a causa delle condizioni meteo particolarmente favorevoli ($H_i=1599$ kWh/m²) migliori, rispetto al 2002, per tutti i mesi salvo ottobre. La produzione annuale, sempre fortemente correlata con l'insolazione (vedi Figura 20), anche nel 2004 ha superato per la seconda volta consecutiva i 100 MWh/a, soglia mai raggiunta negli 11 anni di funzionamenti precedenti. Ricordiamo che la produzione annua attesa, a seguito del risanamento, era di 95 –100 MWh.

Da notare che nel corso del 2004 l'impianto ha raggiunto un altro importante traguardo, erogando il suo milionesimo kWh: più precisamente dalla sua messa in funzione nel 1992, l'impianto ha prodotto 1'012,941 MWh, per un tempo totale di funzionamento degli ondulatori di 34'426 h.

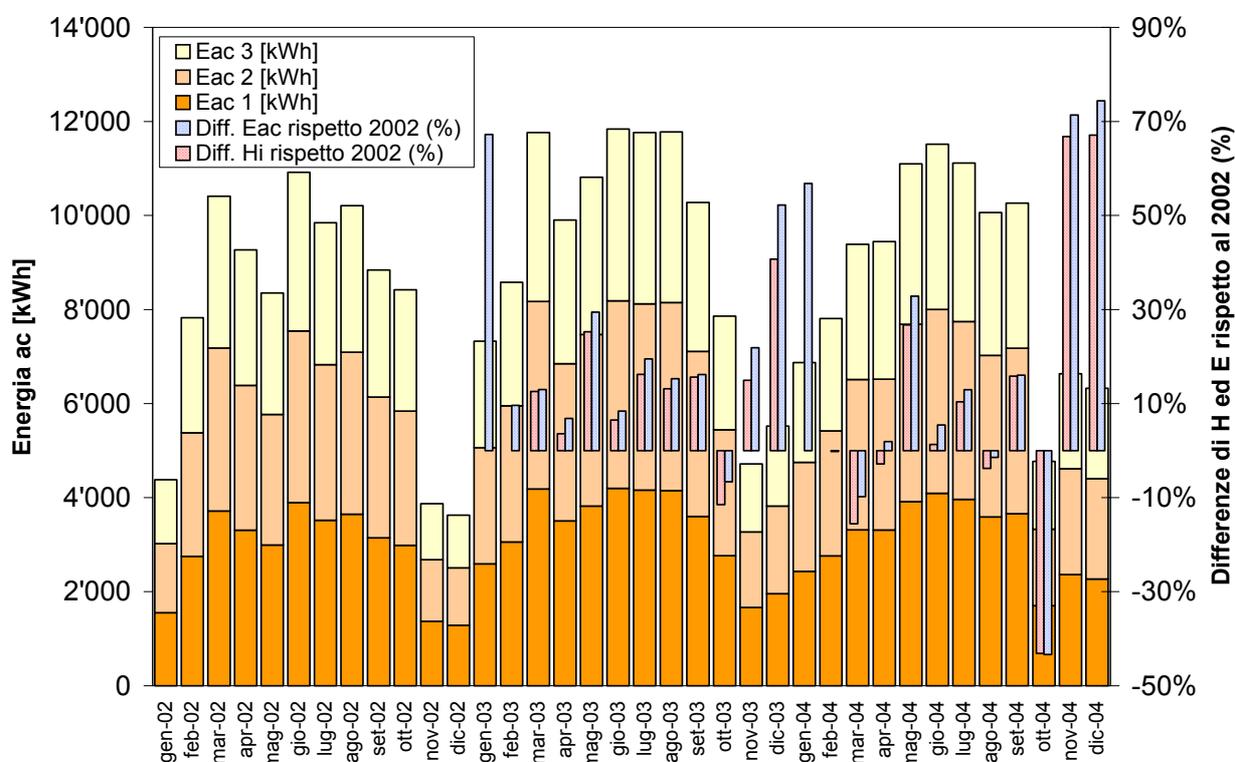


Figura 20: Produzione mensile di energia AC dei tre campi, dal 2002 al 2004, e differenze in % rispetto al 2002

Malgrado il buon funzionamento globale dell'impianto, si è recentemente osservato uno squilibrio tra i tre campi; infatti a partire dalla primavera 2004, la produzione del campo 3, rispetto alla produzione totale, è scesa di ca. 0.6 punti percentuali, passando cioè da grossomodo 30.8-31.0% a 30.2-30.4% (vedi Figura 21). Le cause sono probabilmente da ricercare nella sporcizia dei moduli del campo 3, rispettivamente in una serie con curva IV anomala di questo campo. Su queste problematiche, complesse da spiegare, si sta tuttora indagando.

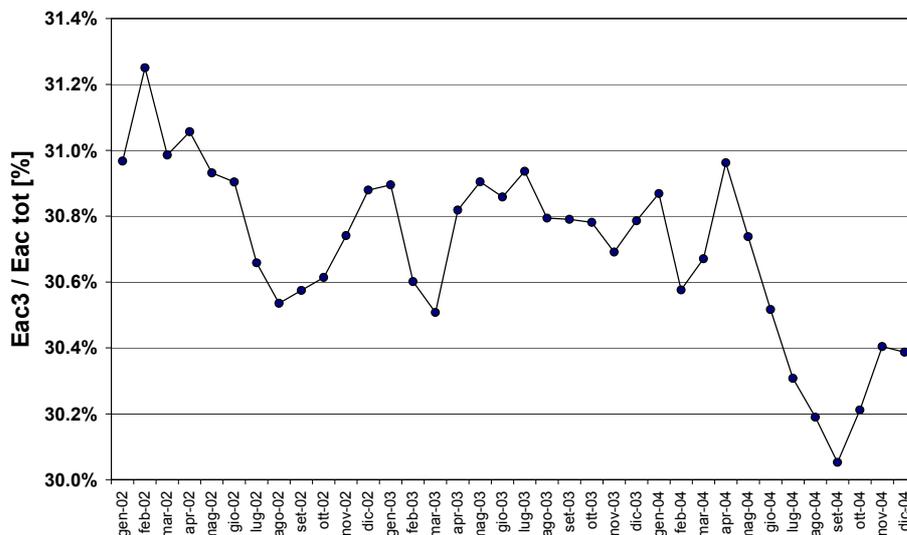


Figura 21: Rapporto in percentuale tra l'energia prodotta dal campo 3 e l'energia totale ac, dal 2002 al 2004

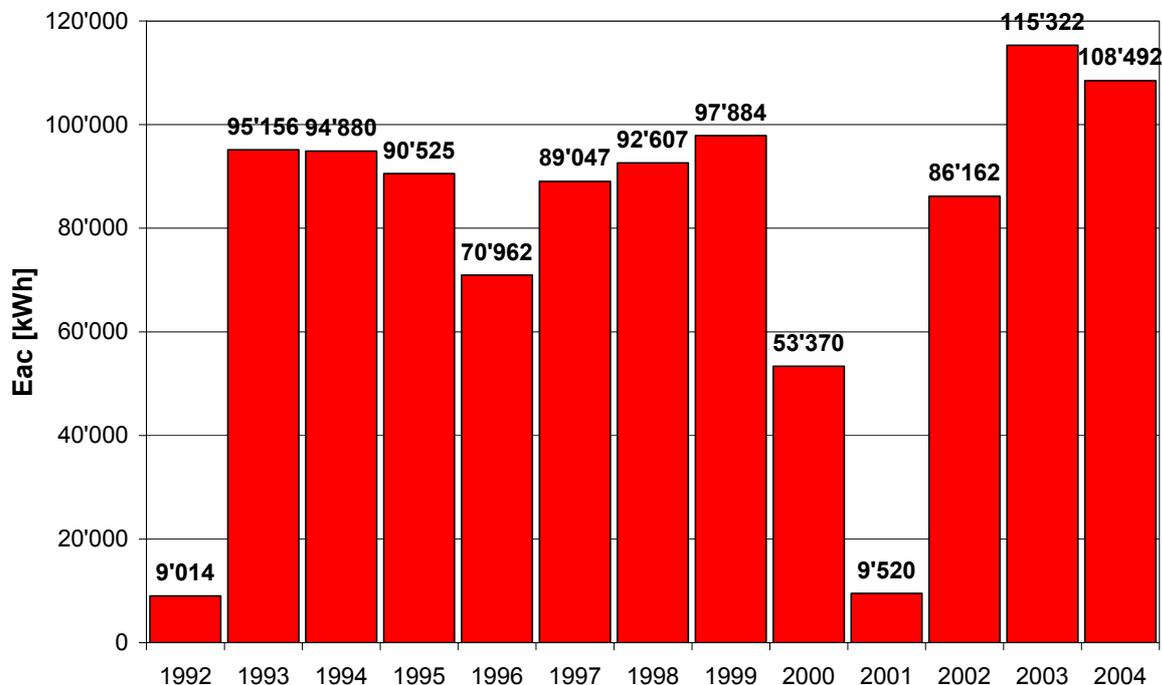


Figura 22: Produzione annuale di energia ac, dal 1992 al 2004 (EIO⁽¹⁾): energia ac, meno il consumo degli ondulatori)

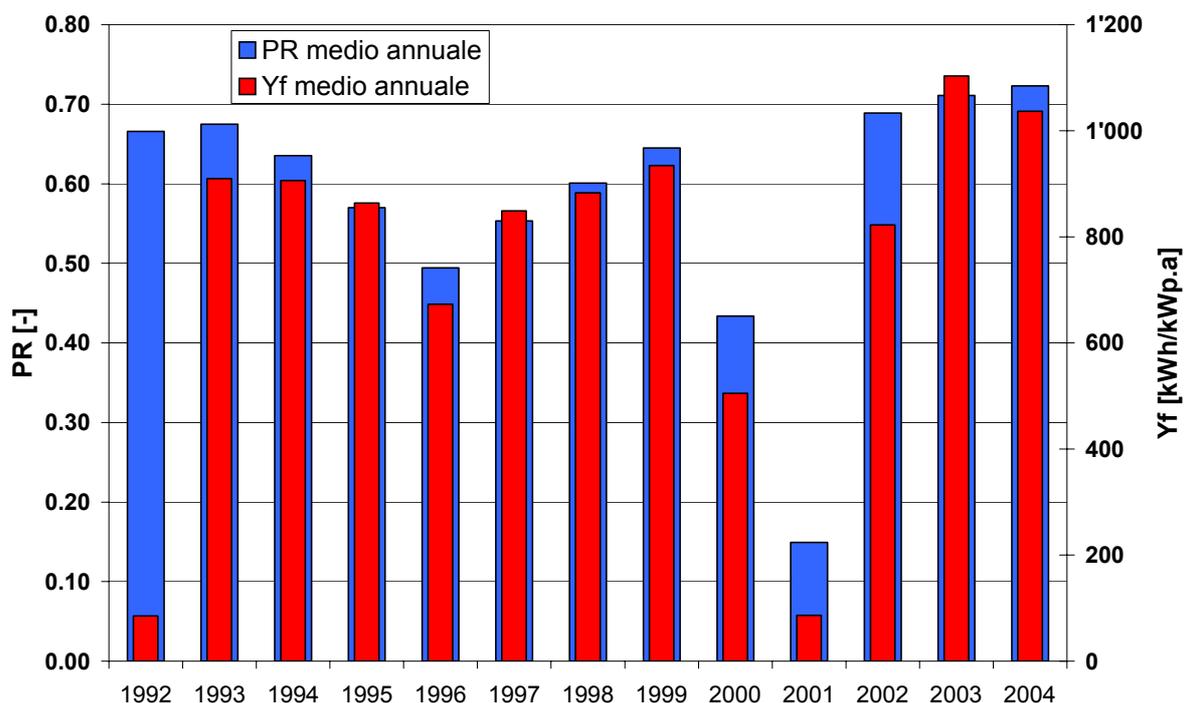


Figura 23: PR e Yf medi annuali, dal 1992 al 2004

Performance Ratio (PR): per il PR medio annuo valgono le medesime considerazioni fatte per la produzione di energia: dalla messa in funzione dell'impianto, solamente negli ultimi due anni è stato superato il valore limite del 70%, con 71% nel 2003 rispettivamente 72% nel 2004. Più precisamente durante gli ultimi tre anni il PR medio è stato del 70.7%; nel periodo precedente il risanamento il PR annuo medio era stato del 59.7%, pur tralasciando nel calcolo gli anni 1992, 2000 e 2001, periodi caratterizzati dal funzionamento parziale dell'impianto. Questo miglioramento è ben visibile in Figura 23 (vedi anche Figura 25).

Questi dati, mai registrati sinora, confermano l'ottimo funzionamento della parte elettronica dopo le modifiche. In particolare il numero annuo di ore di funzionamento dei nuovi ondulatori – caratterizzati da una soglia d'inserimento più bassa – è superiore rispetto al passato. Ad esempio, solamente negli ultimi 12 mesi, gli ondulatori sono stati operativi per 3'890 ore (vedi colonna Opiniv Figura 24). Il PR di questo impianto è simile al PR medio dei migliori impianti collegati alla rete in Ticino (media 71%). Se invece di utilizzare $P_n=103.42\text{kW}$, si utilizzasse la potenza reale stimata in base alle misure STC dei moduli di riferimento (vedi cap. 4), il PR di questo impianto risulterebbe ancora migliore, e sarebbe di ca. 79%.

Final Yield (Yf): l'indice di produzione Yf (Figura 23 e Figura 25, ultima colonna a destra) negli ultimi tre anni è stato di 823, rispettivamente di 1'103 e 1'037 kWh/kWp (per il 2002 mancano i primi due mesi di monitoraggio). Il miglior indice registrato in passato era stato quello del 1999, di 935 kWh/kWp.

Questo indice, per poter essere confrontato con i valori degli scorsi anni, è stato calcolato utilizzando:

- Potenza: 103 kW (come per il calcolo del PR)
- Energia: $EIO = EIO^{(1)} - EM$, cioè l'energia "netta" immessa in rete, che corrisponde all'energia ac prodotta meno l'energia consumata dal monitoraggio e dal locale tecnico (vedi Figura 24).

Se si utilizzano dei dati più realistici quali:

- Potenza : 91.7 kW (potenza ricavata dalle misure IV outdoor corrette a STC), e

- Energia: EIO(1), energia AC prodotta dell'ondulatore

allora l'indice Y_f del 2003 e del 2004 passa a 1'258, rispettivamente a 1'183 kWh/kWp, indice analogo a quello di un buon impianto in Ticino.

3.1.6. Principali indici di funzionamento: dati mensili formato IEA

Le figure seguenti (Figura 24 e Figura 25) riportano i principali dati di funzionamento dell'impianto, calcolati e presentati secondo il formato dati IEA descritto al capitolo 2.2.

La Figura 24 fornisce principalmente i dati meteo e le energie, mentre la Figura 25 i principali indici di funzionamento quali gli indici di produzione, performance ratio, rendimenti, perdite, disponibilità, eccetera. Questi dati sono stati commentati al capitolo precedente.

Entrambe le tabelle riportano i valori annuali dal 1992 al 2004 (in alto), seguiti dal dettaglio mensile per gli ultimi tre anni. Sia in Figura 24 che in Figura 25, per il calcolo della media sul periodo 1992..2004 sono stati tralasciati volutamente gli anni 1992, 2000, 2001, che avrebbero dato risultati forvianti in quanto:

- 1992: l'impianto ha funzionato solo in novembre e dicembre
- 2000: in novembre e dicembre l'impianto non era in funzione (problemi all'ondulatore)
- 2001: impianto e acquisizione dati in funzione fino a metà giugno; in seguito inizio lavori di risanamento

| | Total time of monitoring | Monitoring Fraction | Outage fraction | Availability inverter | Total irradiation, horizontal | Total irradiation, array plane | Ambient temperature | Array output energy (DC) | Net energy from inverter (AC) | Monitoring and help energy | Net energy from inverter, in the grid (AC) |
|-------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|
| AET III | t M | M | O | OPinv | H | H I | T am | E A | E IO ⁽¹⁾ | E M | E IO |
| 103 kW | [h] | [-] | [-] | [h] | [kWh/m ²] | [kWh/m ²] | [°C] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] |
| 1992 | 1'415 | 0.2 | 0.11 | 372 | 63 | 131 | 3.4 | 9'756 | 9'014 | 230 | 8'784 |
| 1993 | 8'760 | 1.0 | 0.07 | 3'299 | 1'220 | 1'369 | 12.3 | 101'048 | 95'156 | 1'453 | 93'703 |
| 1994 | 8'760 | 1.0 | 0.02 | 3'452 | 1'260 | 1'450 | 13.9 | 99'829 | 94'880 | 1'540 | 93'340 |
| 1995 | 8'760 | 1.0 | 0.04 | 3'414 | 1'305 | 1'542 | 13.4 | 94'937 | 90'525 | 1'549 | 88'976 |
| 1996 | 8'784 | 1.0 | 0.26 | 2'458 | 1'247 | 1'394 | 13.2 | 74'691 | 70'962 | 1'675 | 69'287 |
| 1997 | 8'760 | 1.0 | 0.15 | 2'720 | 1'334 | 1'563 | 13.9 | 92'470 | 89'047 | 1'638 | 87'409 |
| 1998 | 8'519 | 1.0 | 0.11 | 2'756 | 1'239 | 1'496 | 13.2 | 98'519 | 92'607 | 1'649 | 90'958 |
| 1999 | 8'760 | 1.0 | 0.08 | 2'829 | 1'241 | 1'473 | 13.5 | 100'856 | 97'884 | 1'630 | 96'254 |
| 2000 | 7'728 | 0.9 | 0.31 | 1'734 | 1'016 | 1'195 | 12.9 | 55'105 | 53'370 | 1'329 | 52'041 |
| 2001 | 3'874 | 0.4 | 0.75 | 306 | 348 | 619 | 11.0 | 10'035 | 9'520 | 640 | 8'880 |
| 2002 | 7'344 | 0.8 | 0.01 | 3'316 | 1'095 | 1'228 | 15.3 | 92'036 | 86'162 | 1'434 | 84'728 |
| 2003 | 8'760 | 1.0 | 0.01 | 3'881 | 1'342 | 1'599 | 14.1 | 123'112 | 115'322 | 1'698 | 113'624 |
| 2004 | 8'784 | 1.0 | 0.01 | 3'890 | 1'252 | 1'473 | 13.2 | 115'761 | 108'492 | 1'695 | 106'796 |
| Totale Media | 8'599 | 1.0 | 0.08 | 3'426 | 1'253 | 1'459 | 13.6 | 99'326 | 1'012'941 | 18'162 | 994'780 |
| gen-02 | | | | | | | | | | | |
| feb-02 | | | | | | | | | | | |
| mar-02 | 744 | 1.0 | 0.03 | 334 | 112 | 149 | 10.7 | 11'437 | 10'702 | 147 | 10'555 |
| apr-02 | 720 | 1.0 | 0.01 | 357 | 124 | 134 | 13.6 | 10'171 | 9'516 | 142 | 9'374 |
| mag-02 | 744 | 1.0 | 0.01 | 376 | 131 | 124 | 16.4 | 9'174 | 8'596 | 147 | 8'449 |
| gio-02 | 720 | 1.0 | 0.01 | 414 | 178 | 167 | 22.7 | 11'999 | 11'225 | 143 | 11'082 |
| lug-02 | 744 | 1.0 | 0.00 | 410 | 160 | 150 | 21.4 | 10'842 | 10'118 | 143 | 9'974 |
| ago-02 | 744 | 1.0 | 0.02 | 386 | 149 | 154 | 21.4 | 11'232 | 10'504 | 148 | 10'356 |
| set-02 | 720 | 1.0 | 0.00 | 332 | 107 | 128 | 17.8 | 9'714 | 9'101 | 140 | 8'961 |
| ott-02 | 744 | 1.0 | 0.00 | 292 | 79 | 118 | 13.4 | 9'233 | 8'662 | 143 | 8'519 |
| nov-02 | 720 | 1.0 | 0.00 | 194 | 30 | 53 | 9.8 | 4'253 | 3'991 | 139 | 3'852 |
| dic-02 | 744 | 1.0 | 0.00 | 221 | 26 | 50 | 5.4 | 3'980 | 3'748 | 142 | 3'606 |
| gen-03 | 744 | 1.0 | 0.00 | 243 | 51 | 102 | 3.5 | 8'171 | 7'698 | 141 | 7'557 |
| feb-03 | 672 | 1.0 | 0.04 | 247 | 73 | 123 | 2.8 | 9'141 | 8'590 | 128 | 8'463 |
| mar-03 | 744 | 1.0 | 0.01 | 339 | 124 | 168 | 10.4 | 12'885 | 12'094 | 145 | 11'949 |
| apr-03 | 720 | 1.0 | 0.01 | 354 | 126 | 139 | 13.3 | 10'890 | 10'190 | 140 | 10'050 |
| mag-03 | 744 | 1.0 | 0.01 | 415 | 162 | 156 | 19.4 | 11'887 | 11'130 | 146 | 10'983 |
| gio-03 | 720 | 1.0 | 0.02 | 422 | 192 | 177 | 26.0 | 13'037 | 12'177 | 143 | 12'035 |
| lug-03 | 744 | 1.0 | 0.02 | 417 | 185 | 174 | 25.0 | 12'954 | 12'099 | 148 | 11'951 |
| ago-03 | 744 | 1.0 | 0.02 | 396 | 168 | 174 | 25.8 | 12'971 | 12'111 | 148 | 11'963 |
| set-03 | 720 | 1.0 | 0.02 | 337 | 120 | 148 | 18.5 | 11'292 | 10'571 | 141 | 10'430 |
| ott-03 | 744 | 1.0 | 0.00 | 291 | 73 | 105 | 12.0 | 8'643 | 8'100 | 142 | 7'958 |
| nov-03 | 720 | 1.0 | 0.00 | 214 | 35 | 61 | 7.9 | 5'185 | 4'867 | 136 | 4'731 |
| dic-03 | 744 | 1.0 | 0.01 | 207 | 32 | 70 | 4.2 | 6'057 | 5'695 | 140 | 5'555 |
| gen-04 | 744 | 1.0 | 0.01 | 242 | 46 | 88 | 3.2 | 7'534 | 7'087 | 141 | 6'946 |
| feb-04 | 696 | 1.0 | 0.00 | 258 | 63 | 102 | 4.9 | 8'563 | 8'049 | 132 | 7'917 |
| mar-04 | 744 | 1.0 | 0.01 | 326 | 99 | 126 | 8.7 | 10'312 | 9'669 | 143 | 9'526 |
| apr-04 | 720 | 1.0 | 0.01 | 357 | 123 | 131 | 13.0 | 10'397 | 9'731 | 139 | 9'592 |
| mag-04 | 744 | 1.0 | 0.01 | 414 | 168 | 158 | 16.3 | 12'210 | 11'426 | 145 | 11'281 |
| gio-04 | 720 | 1.0 | 0.02 | 424 | 186 | 169 | 22.4 | 12'603 | 11'783 | 141 | 11'642 |
| lug-04 | 744 | 1.0 | 0.01 | 424 | 176 | 166 | 23.0 | 12'332 | 11'529 | 146 | 11'383 |
| ago-04 | 744 | 1.0 | 0.01 | 376 | 139 | 148 | 21.7 | 11'070 | 10'346 | 146 | 10'201 |
| set-04 | 720 | 1.0 | 0.01 | 334 | 119 | 149 | 19.4 | 11'293 | 10'566 | 142 | 10'425 |
| ott-04 | 744 | 1.0 | 0.00 | 269 | 50 | 67 | 14.6 | 5'259 | 4'936 | 142 | 4'794 |
| nov-04 | 720 | 1.0 | 0.00 | 241 | 46 | 89 | 7.6 | 7'264 | 6'841 | 137 | 6'704 |
| dic-04 | 744 | 1.0 | 0.00 | 224 | 37 | 83 | 3.4 | 6'924 | 6'528 | 141 | 6'387 |
| Totale Media an. | 24'888 | 0.9 | 0.01 | 11'087 | 3'689 | 4'299 | 14.2 | 330'909 | 309'975 | 4'828 | 305'148 |
| | 8'296 | | | 3'696 | 1'230 | 1'433 | | 110'303 | 103'325 | 1'609 | 101'716 |

Figura 24: Principali indici di monitoraggio, meteo ed energie. Valori annuali dal 1992 al 2004, e dettaglio mensile per gli anni 2002, 2003 e 2004.

⁷ Impianto in funzione dal 1.1.02, ma il nuovo sistema acquisizione dal 1.3.02 (compreso anche i primi 2 mesi E IO⁽¹⁾ = 95'977kWh)

| AET III 103 kW | Reference Yield, global | Reference Yield, in- plane | Array Yield | Final Yield | System Losses | Array Capture Losses | Performance Ratio | Array efficiency | Inverter efficiency | Overall PV plant efficiency | Availability inverter | Availability array | Module temperature by operation | Annual Final Yield |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|---------------|----------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|
| | Yr.g | Yr | Ya [kWh / (KWp.d)] | Yf | Ls | Lc | PR [-] | n Arr - | n Inv - | n tot - | Inv [%] | Array [%] | Tp b [°C] | Yf [kWh/kW] |
| 1992 | 1.15 | 2.39 | 1.72 | 1.59 | 0.13 | 0.67 | 0.67 | 0.077 | 0.924 | 0.071 | 89 | 94 | 27.5 | |
| 1993 | 3.34 | 3.75 | 2.69 | 2.53 | 0.16 | 1.06 | 0.68 | 0.077 | 0.942 | 0.072 | 93 | 99 | 35.9 | 910 |
| 1994 | 3.45 | 3.97 | 2.66 | 2.52 | 0.13 | 1.32 | 0.64 | 0.072 | 0.950 | 0.068 | 98 | 100 | 38.5 | 906 |
| 1995 | 3.58 | 4.22 | 2.53 | 2.41 | 0.12 | 1.70 | 0.57 | 0.064 | 0.954 | 0.061 | 96 | 100 | 37.2 | 864 |
| 1996 | 3.41 | 3.81 | 1.98 | 1.88 | 0.10 | 1.83 | 0.49 | 0.056 | 0.950 | 0.053 | 74 | 100 | 37.2 | 673 |
| 1997 | 3.66 | 4.28 | 2.46 | 2.37 | 0.09 | 1.82 | 0.55 | 0.062 | 0.963 | 0.059 | 85 | 100 | 39.0 | 849 |
| 1998 | 3.50 | 4.23 | 2.70 | 2.54 | 0.16 | 1.52 | 0.60 | 0.068 | 0.940 | 0.064 | 89 | 100 | 36.0 | 883 |
| 1999 | 3.40 | 4.04 | 2.68 | 2.60 | 0.08 | 1.35 | 0.65 | 0.071 | 0.971 | 0.069 | 92 | 100 | 34.3 | 935 |
| 2000 | 3.16 | 3.71 | 1.66 | 1.61 | 0.05 | 2.05 | 0.43 | 0.048 | 0.969 | 0.046 | 69 | 100 | 35.5 | 505 |
| 2001 | 2.16 | 3.84 | 0.61 | 0.57 | 0.03 | 3.24 | 0.15 | 0.017 | 0.949 | 0.016 | 25 | 100 | 28.9 | 86 |
| 2002 | 3.58 | 4.01 | 2.92 | 2.73 | 0.19 | 1.09 | 0.69 | 0.079 | 0.937 | 0.074 | 99 | 100 | 32.7 | 823 |
| 2003 | 3.67 | 4.38 | 3.27 | 3.07 | 0.21 | 1.11 | 0.71 | 0.081 | 0.937 | 0.076 | 99 | 99 | 29.1 | 1'103 |
| 2004 | 3.42 | 4.03 | 3.07 | 2.88 | 0.19 | 0.95 | 0.72 | 0.083 | 0.938 | 0.077 | 99.1 | 100 | 26.8 | 1'037 |
| Media '92-'04 | 3.50 | 4.07 | 2.70 | 2.55 | 0.14 | 1.38 | 0.63 | 0.07 | 0.95 | 0.07 | 92.4 | 99.9 | 34.7 | 898 |
| gen-02 | | | | | | | | | | | | | | |
| feb-02 | | | | | | | | | | | | | | |
| mar-02 | 3.62 | 4.81 | 3.58 | 3.35 | 0.23 | 1.22 | 0.70 | 0.080 | 0.936 | 0.075 | 97.5 | 100 | 28.4 | |
| apr-02 | 4.13 | 4.48 | 3.29 | 3.08 | 0.21 | 1.19 | 0.69 | 0.079 | 0.936 | 0.074 | 98.9 | 100 | 30.7 | |
| mag-02 | 4.23 | 4.01 | 2.87 | 2.69 | 0.18 | 1.14 | 0.67 | 0.077 | 0.937 | 0.072 | 98.9 | 100 | 33.3 | |
| gio-02 | 5.92 | 5.55 | 3.88 | 3.63 | 0.25 | 1.67 | 0.65 | 0.075 | 0.935 | 0.070 | 99.4 | 100 | 41.5 | |
| lug-02 | 5.16 | 4.84 | 3.40 | 3.17 | 0.23 | 1.44 | 0.65 | 0.075 | 0.933 | 0.070 | 99.7 | 100 | 40.3 | |
| ago-02 | 4.80 | 4.96 | 3.52 | 3.29 | 0.23 | 1.44 | 0.66 | 0.076 | 0.935 | 0.071 | 97.7 | 100 | 40.5 | |
| set-02 | 3.56 | 4.28 | 3.14 | 2.95 | 0.20 | 1.13 | 0.69 | 0.079 | 0.937 | 0.074 | 99.6 | 100 | 35.3 | |
| ott-02 | 2.54 | 3.82 | 2.89 | 2.71 | 0.18 | 0.93 | 0.71 | 0.081 | 0.938 | 0.076 | 99.6 | 100 | 32.9 | |
| nov-02 | 1.01 | 1.78 | 1.38 | 1.29 | 0.08 | 0.40 | 0.73 | 0.083 | 0.938 | 0.078 | 100.0 | 100 | 25.0 | |
| dic-02 | 0.85 | 1.597 | 1.25 | 1.17 | 0.07 | 0.35 | 0.74 | 0.084 | 0.942 | 0.079 | 100.0 | 100 | 19.2 | |
| gen-03 | 1.64 | 3.31 | 2.56 | 2.41 | 0.15 | 0.75 | 0.73 | 0.083 | 0.942 | 0.078 | 99.5 | 100 | 22.4 | |
| feb-03 | 2.62 | 4.41 | 3.17 | 2.98 | 0.19 | 1.24 | 0.68 | 0.077 | 0.940 | 0.072 | 96.4 | 96.5 | 23.4 | |
| mar-03 | 4.01 | 5.41 | 4.04 | 3.79 | 0.25 | 1.38 | 0.70 | 0.080 | 0.939 | 0.075 | 99.1 | 100 | 25.7 | |
| apr-03 | 4.18 | 4.64 | 3.52 | 3.30 | 0.23 | 1.12 | 0.71 | 0.081 | 0.936 | 0.076 | 99.1 | 100 | 25.5 | |
| mag-03 | 5.24 | 5.02 | 3.72 | 3.49 | 0.24 | 1.30 | 0.69 | 0.079 | 0.936 | 0.074 | 98.6 | 100 | 32.2 | |
| gio-03 | 6.40 | 5.91 | 4.22 | 3.94 | 0.28 | 1.69 | 0.67 | 0.076 | 0.934 | 0.071 | 98.1 | 100 | 41.1 | |
| lug-03 | 5.98 | 5.62 | 4.06 | 3.79 | 0.27 | 1.57 | 0.67 | 0.077 | 0.934 | 0.072 | 98.1 | 100 | 40.0 | |
| ago-03 | 5.41 | 5.61 | 4.06 | 3.79 | 0.27 | 1.55 | 0.68 | 0.077 | 0.934 | 0.072 | 98.2 | 100 | 41.9 | |
| set-03 | 4.01 | 4.95 | 3.65 | 3.42 | 0.23 | 1.29 | 0.69 | 0.079 | 0.936 | 0.074 | 98.4 | 100 | 33.4 | |
| ott-03 | 2.35 | 3.38 | 2.71 | 2.54 | 0.17 | 0.67 | 0.75 | 0.086 | 0.937 | 0.080 | 99.7 | 100 | 25.2 | |
| nov-03 | 1.16 | 2.04 | 1.68 | 1.57 | 0.10 | 0.37 | 0.77 | 0.088 | 0.939 | 0.082 | 99.9 | 100 | 19.6 | |
| dic-03 | 1.04 | 2.25 | 1.90 | 1.78 | 0.11 | 0.35 | 0.79 | 0.090 | 0.940 | 0.085 | 99.5 | 100 | 18.3 | |
| gen-04 | 1.47 | 2.83 | 2.36 | 2.22 | 0.14 | 0.48 | 0.78 | 0.089 | 0.941 | 0.084 | 99.1 | 100 | 18.6 | |
| feb-04 | 2.19 | 3.51 | 2.87 | 2.69 | 0.17 | 0.64 | 0.77 | 0.088 | 0.940 | 0.082 | 99.7 | 100 | 18.6 | |
| mar-04 | 3.21 | 4.06 | 3.23 | 3.03 | 0.20 | 0.83 | 0.75 | 0.085 | 0.938 | 0.080 | 99.0 | 100 | 20.3 | |
| apr-04 | 4.11 | 4.36 | 3.36 | 3.15 | 0.22 | 0.99 | 0.72 | 0.083 | 0.936 | 0.077 | 99.3 | 100 | 25.0 | |
| mag-04 | 5.41 | 5.08 | 3.82 | 3.58 | 0.25 | 1.26 | 0.70 | 0.081 | 0.936 | 0.075 | 98.8 | 100 | 28.8 | |
| gio-04 | 6.20 | 5.63 | 4.08 | 3.81 | 0.27 | 1.55 | 0.68 | 0.078 | 0.935 | 0.073 | 97.7 | 100 | 36.3 | |
| lug-04 | 5.67 | 5.34 | 3.86 | 3.61 | 0.25 | 1.48 | 0.68 | 0.077 | 0.935 | 0.072 | 98.5 | 100 | 36.8 | |
| ago-04 | 4.49 | 4.77 | 3.47 | 3.24 | 0.23 | 1.31 | 0.68 | 0.078 | 0.935 | 0.073 | 98.9 | 100 | 36.0 | |
| set-04 | 3.95 | 4.95 | 3.65 | 3.42 | 0.24 | 1.30 | 0.69 | 0.079 | 0.936 | 0.074 | 99.3 | 100 | 35.1 | |
| ott-04 | 1.63 | 2.17 | 1.65 | 1.55 | 0.10 | 0.52 | 0.71 | 0.081 | 0.939 | 0.076 | 99.8 | 100 | 23.9 | |
| nov-04 | 1.54 | 2.96 | 2.35 | 2.21 | 0.14 | 0.61 | 0.75 | 0.085 | 0.942 | 0.080 | 99.8 | 100 | 21.5 | |
| dic-04 | 1.20 | 2.67 | 2.17 | 2.04 | 0.12 | 0.50 | 0.77 | 0.087 | 0.943 | 0.082 | 99.7 | 100 | 20.8 | |
| Media annuale | 3.56 | 4.14 | 3.09 | 2.89 | 0.20 | 1.05 | 0.71 | 0.081 | 0.937 | 0.076 | 99.0 | 100 | 29.5 | |

Figura 25: Principali indici di funzionamento: indici di produzione, performance ratio, rendimenti, e disponibilità. Valori annuali dal '92 al '04, e dettaglio mensile per gli ultimi 3 anni (vedi note Figura 24).

3.2. Monitoraggio delle stringhe

Dopo la sostituzione completa dei moduli avvenuta nel 1998, fu effettuato un monitoraggio intensivo delle singole stringhe. Visto la serie di problemi legati all'affidabilità dei moduli, con il presente progetto si è voluto proseguire il monitoraggio di dettaglio delle stringhe per almeno tre anni.

Lo scopo del sistema d'acquisizione secondario (composto da 6 dataloggers disposti lungo l'impianto in 6 box, vedi cap. 2.1.2) è di sorvegliare singolarmente tutte le stringhe. Questi dati permettono di confrontare le stringhe (valutazioni relative), nonché di valutarne il rendimento di ciascuna ($I=f(G)$), in modo da identificare immediatamente eventuali malfunzionamenti.

Dal monitoraggio emerge che tutte le 48 stringhe (6x8) funzionano correttamente.

Ci sono tuttavia differenze tra le varie stringhe dello stesso box. Per il box 1 queste differenze sono minime e la corrente di ogni stringa è praticamente proporzionale all'irraggiamento; per i box 2, 3,..6 le differenze tra le stringhe aumentano sempre più, cioè spostandosi verso ovest la relazione lineare $I_{dc}=\alpha \cdot G$ diventa viepiù imprecisa, ovvero la dispersione dei dati aumenta (sporczia, mismatch, ecc).

La Figura 26 mette a confronto le correnti dc - in funzione dell'irraggiamento - delle stringhe di tutti i box e, in basso, solo dei box 1 e 6; per questioni di leggibilità i dati sono stati condensati e i valori riportati corrispondono, per ogni box, alla corrente media delle 8 stringhe. È ben visibile (Figura 26) come mediamente le stringhe del box 1 (est) producano più di quelle del box 6 (ovest): ad esempio con un irraggiamento di $1'000 \text{ W/m}^2$ (vedi anche Figura 28) tutte le stringhe del box 1 producono ca. 3.2 Adc, mentre nessuna stringa del box 6 produce più di 3 Adc. I box 2..5 si situano, in termini di efficienza, tra i box 1 e 6.

La Figura 27 confronta una stringa particolarmente buona (stringa 1 box 1, punti blu) con una cattiva (stringa 8 box 6, punti rossi). Da notare che i valori di quest'ultima oltre che essere visibilmente inferiori a parità d'irraggiamento sono anche più dispersi, segno questo di funzionamento non ottimale (in particolare a bassi irraggiamenti si può osservare una correlazione dei dati minima, rispettivamente un basso rendimento).

Le differenze sono più marcate tra i 3 campi: il campo est (box 1 & 2) è il più efficiente (campo di riferimento), il campo centrale (box 3 & 4) produce ca. il 6% in meno rispetto al campo est, mentre il campo ovest (box 5 & 6) produce ca. il 12% in meno rispetto campo est. Queste inomogeneità concordano perfettamente con le misure della potenza a STC dei 26 moduli di riferimento (vedi cap 4.1), con le misure delle curve IV outdoor (cap. 4.3), e sono spiegate, in parte, anche con l'analisi termografica (cap. 4.2).

La Figura 28 mostra la corrente dc prodotta a $1'000 \text{ W/m}^2$ dalle 48 stringhe dell'impianto. In questa figura sono state evidenziate in verde 4 stringhe particolarmente "performanti", e in rosso 3 stringhe particolarmente "poco efficienti". Le medesime stringhe, e per le stesse caratteristiche, si sono distinte durante la misura della curva I-V outdoor (vedi cap. 4.3): ad esempio la Figura 50 che riporta la potenza massima @ STC delle 48 stringhe, fornisce la stessa informazione della Figura 28, ovvero, anche se la grandezza sull'asse dell'ordinata è diversa, la "forma" dell'istogramma è identica. In particolare in entrambe le figure spicca la serie 2 del box 5 (S2B5).

Da queste constatazioni si deduce che queste due misure, ossia la misura della corrente dc rispettivamente la misura della curva IV outdoor delle stringhe, nell'ottica della sorveglianza del buon funzionamento di un impianto sono in parte ridondanti. La misura e la correzione a STC delle curve IV (operazione che tra l'altro richiede tempo e speciali apparecchiature) è infatti necessaria solo se dalla prima misura (correnti dc) dovessero emergere particolari problemi.

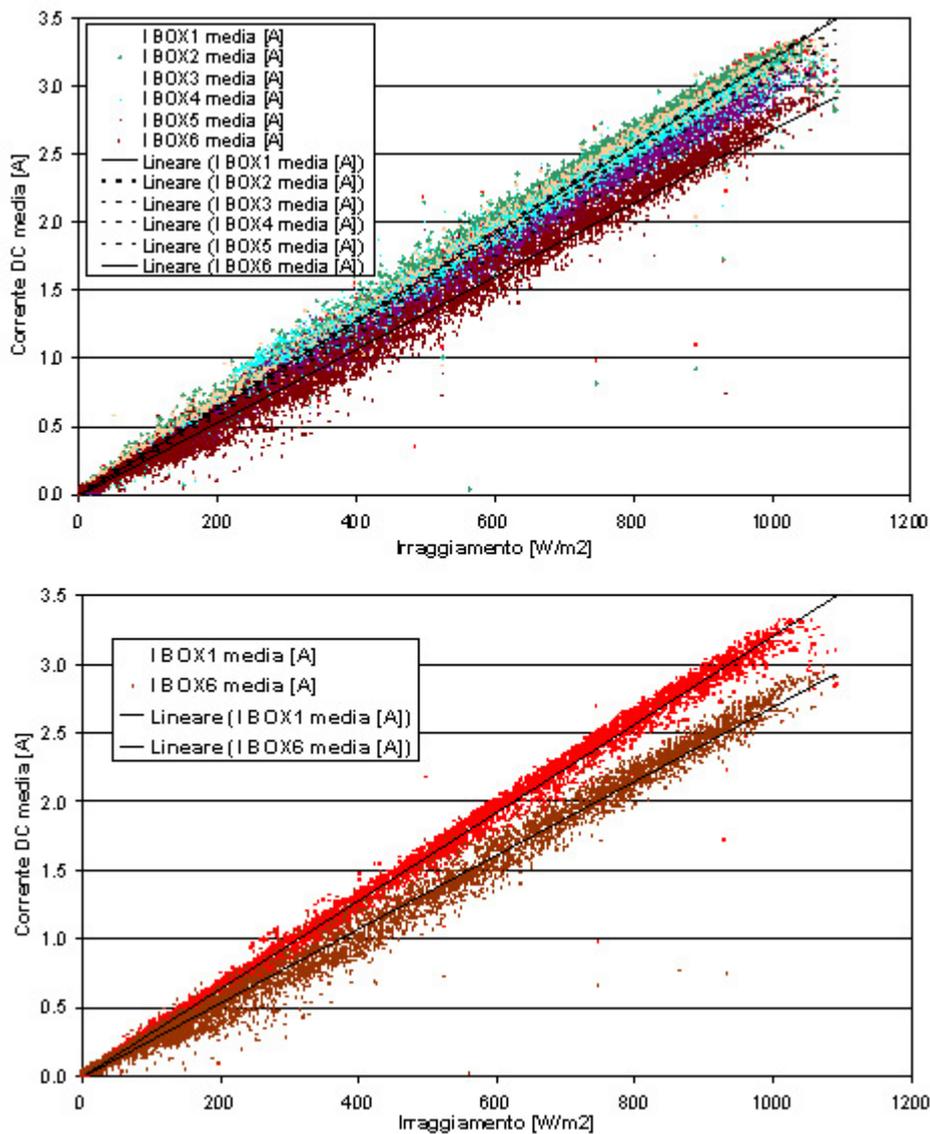


Figura 26: Corrente **media** delle stringhe dei box in funzione dell'irraggiamento. In alto sono rappresentati tutti i box (box 1, box 2, box 3, ..., box 6). In basso, per questioni di leggibilità, solo i box 1 e 6.

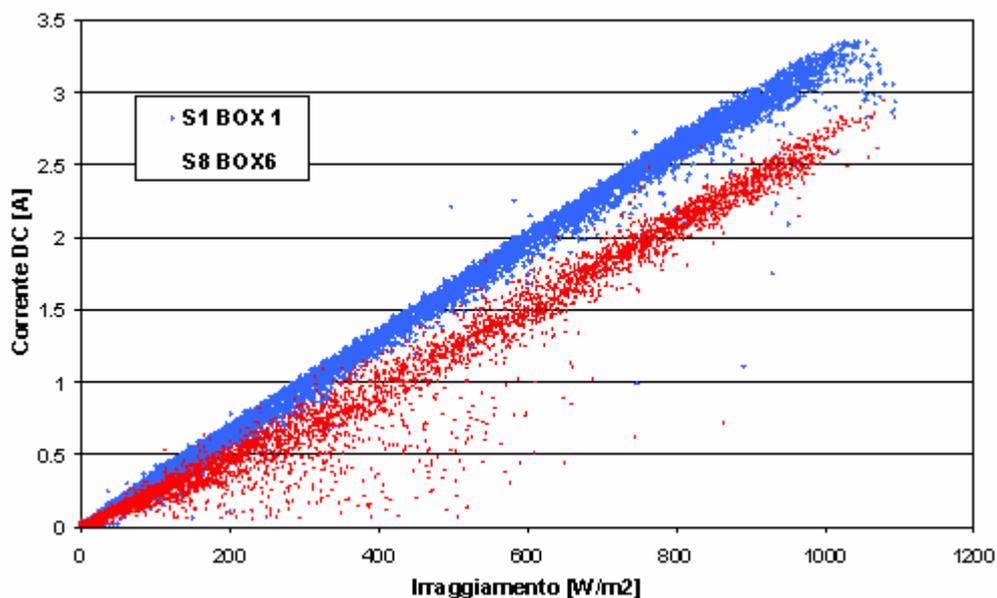


Figura 27: Corrente dc prodotta in funzione dell'irraggiamento. Confronto tra una stringa particolarmente performante (Stringa 1 Box 1) e una poco efficiente (Stringa 8 Box 6).

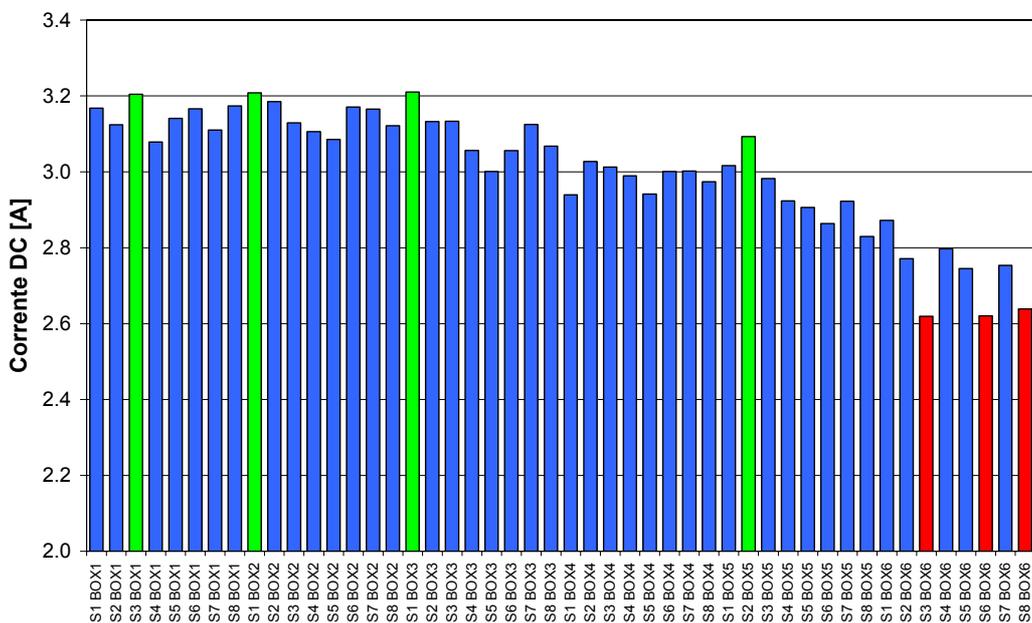


Figura 28: Corrente dc prodotta da ognuna delle 48 stringhe, a 1'000 W/m². La sequenza delle stringhe nel grafico corrisponde alla loro posizione fisica sul campo.

4. Misure puntuali annuali

Oltre alle misure effettuate in continuo e in modo automatico descritte al capitolo 2 e 3, una volta all'anno è stata effettuata:

- La misura della curva I-V indoor a STC presso il simulatore solare del LEEE di 26 moduli di riferimento
- L'analisi termografica dell'intero impianto
- La misura della curva I-V outdoor delle stringhe, con correzione a STC

Queste misure sono giustificate in quanto permettono di sorvegliare in modo accurato la parte dc dell'impianto, in particolare di rilevare un eventuale degrado dei moduli (misure I-V), come già avvenuto in passato, o altri problemi di affidabilità o guasti (termografie). Qualora in futuro il monitoraggio dettagliato (automatico) delle stringhe evidenziasse anomalie in una o più stringhe, queste 3 misure potrebbero essere ripetute e ristrette alle stringhe in questione.

I risultati delle misure annuali puntuali sono descritte di seguito.

4.1. Misure a STC dei moduli di riferimento

Nel corso del progetto è stata effettuata, presso il simulatore solare del LEEE, la misura annuale della curva I-V a STC di un campione di 26 moduli prescelti.

Per avere un campione rappresentativo dell'intero impianto, i moduli di riferimento sono stati prelevati in modo uniforme dai 3 campi, cioè equidistanti l'uno dall'altro (6 moduli dal box 1, 4 moduli da ognuno degli altri box, a gruppi di due); ciò permette di valutare la potenza dell'impianto a distanze regolari lungo tutti i suoi 360 metri di estensione.

Nel 2002 i moduli sono stati misurati sporchi (P1), e dopo averli puliti con acqua (P2); alcuni di loro (i moduli più a ovest) sono stati puliti anche con detergente speciale (P3). Nel 2003 (P4) e nel 2004 (P5) i moduli sono stati misurati solo dopo averli puliti con acqua.

I risultati ottenuti relativi alla potenza sono riportati nella Figura 29 e seguenti fino a Figura 33. Le misure della corrente I_{sc} sono riportate alla Figura 34, mentre le curve IV sono riportate alla Figura 35, Figura 36, e Figura 37.

4.1.1. Potenze @ STC

Differenze est-ovest:

- Spostandosi da est a ovest (cioè dal box 1 al box 6), la potenza dei moduli decresce in modo praticamente lineare. I moduli sono stati installati volutamente in questo modo (trriage) per limitare le perdite di mismatch. La Figura 32 mostra come varia la potenza dei moduli di riferimento in funzione della loro posizione fisica. La potenza del modulo n° 26 è inferiore rispetto a quella del modulo n° 1 del :
 - 13.8%, moduli sporchi (Δ P1)
 - 4.3 %, moduli puliti con acqua (Δ P2, P4, P5 media)
- Inoltre i moduli a ovest sono più sporchi di quelli a est e il grado di sporcizia aumenta in modo quasi lineare spostandosi da est a ovest. Ciò è dovuto alla prossimità della stazione ferroviaria Riazzino-Cugnasco ad ovest dell'impianto.

- Per i moduli a ovest l'influsso della sporcizia si "somma" quindi a quello della bassa potenza installata. Questo spiega le differenze di comportamento ($I=f(G)$) tra i box 1 e 6 (vedi capitolo sul monitoraggio delle stringhe). Inoltre si osserva che mentre i valori dei moduli a est nel 2003 sono praticamente identici a quelli del 2002, quelli dei moduli a ovest sono leggermente inferiori. Ciò mostra che i moduli a ovest (puliti con detergente prima di essere rimontati) hanno tendenza a sporcarsi più rapidamente degli altri. Quindi, per confrontare i dati nel tempo, prima della misura IV occorrerà effettuare (almeno per questi moduli) una pulizia accurata (vedi sotto).

Potenza dei moduli di riferimento; differenza rispetto al valore nominale, stime ed influssi su PR e Y_f :

- La potenza media dei moduli allo stato attuale, cioè la potenza prima della pulizia (P1), è di 101.1 W. Dopo pulizia con acqua, la potenza @ STC è salita in media del 5.5% (P2=106.5 W) e per i moduli più sporchi del 13.2%. Le misure effettuate nel 2003 e nel 2004 hanno confermato i risultati già ottenuti negli anni precedenti, ossia che i moduli non sono degradati. La potenza media (P5) ottenuta nel 2004, di 106.5 W, è addirittura identica a quella del 2002. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 29.
- Estrapolando queste misure (vedi Figura 31), la potenza attuale dell'impianto @ STC è stimata a **87.3 kW** (moduli sporchi) e, con i moduli puliti, la potenza totale dovrebbe salire a **91.9 kW**.
- Queste stime della potenza rappresentano un limite superiore ($P_{stimata} = \text{numero moduli} \times P_m$ media) in quanto non includono le perdite di mismatch; questi valori sono nettamente inferiori rispetto a quelli dichiarati dal fabbricante del 15.6 % rispettivamente del 11.0 % (valori dichiarati dal fabbricante: $P_{m \text{ modulo}} = 120 \text{ W}$ per il tipo di modulo MSX120, rispettivamente 119.7 W se si considera la media dei valori riportati sull'etichetta dei singoli moduli; $P_{m \text{ impianto dichiarata}} = 103.4 \text{ kW}$) (vedi Figura 31)
- Questo valore della potenza @ STC stimata spiega il basso valore dell'indice di produzione Y_f e del PR di questo impianto; se si usa il valore della potenza stimata, i rispettivi indici salgono del 18.4 % (PRac: 70 % \Rightarrow **82.9 %** ; Y_f giornaliero: 3.5 kWh/kWp.g \Rightarrow 4.15 kWh/kWp.g, con $H_i = 5 \text{ kWh/kWp.g}$), avvicinandosi a quelli dei migliori impianti ticinesi allacciati alla rete. L'indice di produzione Y_f e il PR, calcolati sui valori nominali di potenza, risultano quindi bassi a causa di una potenza reale di molto inferiore.

Pulizia dei moduli di riferimento: risultati ottenuti e previsioni

- Dopo la pulizia effettuata unicamente con acqua e straccio, la potenza media dei moduli (P2) è salita del + 5.5%, a 106.5 W (Figura 29). La stessa prova, ma limitata ai moduli più sporchi⁸, ha dato risultati ancora più sorprendenti (vedi Figura 30 e Figura 35): per questi moduli la potenza è aumentata rispettivamente del 10.7% (lavaggio con acqua, $\Delta P1, P2$), del 1.2% (lavaggio con detergente, $\Delta P2, P3$), e del +12.1% (aumento complessivo potenza, $\Delta P1, P3$). Malgrado la sporcizia sia di tipo "aggressivo" (polveri dei freni dei treni), la pulizia con prodotti speciali non è necessaria, in quanto la stessa ha comportato un aumento di potenza contenuto ("solo" +1.2%).
- Pulizia dei campi, effetti previsti: raggruppando i moduli secondo i campi e analizzando i dati (vedi Figura 29 e Figura 33) si possono prevedere, a seguito della pulizia con sola acqua, i seguenti aumenti di potenza:
 - campo 1 (box 1-2): + 2.3 %
 - campo 2 (box 3-4): + 5.2 %

⁸ È stata effettuata un'ulteriore pulizia più accurata e con detergente speciale, ma solo su 6 moduli (cioè i moduli 21 a 26 dei box 5 e 6, quelli più sporchi) e solo nel 2002.

- campo 3 (box 5-6): + 9.8 %
- tutto l'impianto: + 5.5 %
- Si ritiene pertanto che la pulizia dell'intero impianto (solo con acqua), o almeno del campo n° 3, sia giustificata in quanto i risultati sono quantificabili, oltre che dal punto di vista ecologico, anche da quello economico. Infatti, vendendo l'elettricità a 1 Fr al kWh si avrebbe:
 - Pulizia intero impianto:
864 moduli \Rightarrow + 5.5% \Rightarrow + 4.7 kW \Rightarrow + 5'170 kWh/a ca. \Rightarrow **ca. + 5'170 Fr/a**
 - Pulizia campo 3:
288 moduli \Rightarrow + 9.8% \Rightarrow + 2.7 kW \Rightarrow + 2'978 kWh/a ca. \Rightarrow **ca. + 2'978 Fr/a**

La pulizia del campo 3 è più vantaggiosa; in altre parole, il rapporto R "ricavo/spesa" è migliore se si pulisce solo il campo 3: in questo caso il ritorno finanziario è migliore del 73%. Infatti si ha⁹:

$$R_{imp} = \frac{5'170}{3x} [-] ; \quad R_{campo3} = \frac{2'978}{x} [-] \Rightarrow \boxed{\frac{R_{campo3}}{R_{imp.}} = 1.73 [-]}$$

con x = costo pulizia 1 campo (Fr)

Oltre essere più vantaggiosa, la pulizia del campo 3 diminuirebbe sicuramente le perdite di mismatch di questa parte dell'impianto: complessivamente la potenza del campo 3 aumenterebbe di ca. il 10-11 % ($\Delta P_{tot. \text{ campo } 3} = \Delta P_{1,P2} + \Delta P_{mismatch} \cong + 9.8 \% + 1.2 \% = 11\%$)

- La pulizia parziale (solo campo 3) permetterebbe inoltre di valutare la necessità di tale intervento in futuro, rispettivamente di giustificare l'eventuale pulizia dell'intero campo. L'esperimento permetterebbe di rispondere ad interrogativi importanti quali: "per quanto tempo i moduli rimangono puliti?"; "per almeno un anno?"; "sono stati ottenuti i risultati previsti?"

⁹ Sono state fatte le seguenti ipotesi:

- 1) Il costo della pulizia di un campo (cioè x) non deve superare 3'000 Fr, altrimenti il rapporto $R_{campo3} < 1$.
- 2) I moduli rimangono puliti per almeno 1 anno.
- 3) È stato usato un indice di produzione di 1'100 kWh/kWp.a.

| | | | MISURE @ STC | | | | DIFFERENZE | | | |
|--------------|------------------|--------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| | | | 2002 | | 2003 | 2004 | 2002 | 2002-2003 | 2003-2004 | 2002-2004 |
| Campo | Box | N° mod | P1 [W] | P2 [W] | P4 [W] | P5 [W] | Δ P1,P2 % | Δ P2,P4 % | Δ P4,P5 % | Δ P2,P5 % |
| 1..3 | 1..6 | 1..26 | moduli sporchi | pulizia con acqua | pulizia con acqua | pulizia con acqua | sporchi-pulizia acqua | moduli puliti con acqua | | |
| 1 | 1 | 1 | 107.80 | 109.20 | 108.84 | 109.14 | 1.3% | -0.3% | 0.3% | -0.1% |
| 1 | 1 | 2 | 106.60 | 108.50 | 107.65 | 109.84 | 1.8% | -0.8% | 2.0% | 1.2% |
| 1 | 1 | 3 | 105.40 | 107.20 | 107.15 | 107.55 | 1.7% | 0.0% | 0.4% | 0.3% |
| 1 | 1 | 4 | 105.70 | 107.30 | 106.26 | 106.66 | 1.5% | -1.0% | 0.4% | -0.6% |
| 1 | 1 | 5 | 109.40 | 111.30 | 110.93 | 110.93 | 1.7% | -0.3% | 0.0% | -0.3% |
| 1 | 1 | 6 | 106.80 | 109.20 | 108.94 | 109.04 | 2.2% | -0.2% | 0.1% | -0.1% |
| 1 | 2 | 7 | 106.90 | 108.80 | 108.94 | 108.84 | 1.8% | 0.1% | -0.1% | 0.0% |
| 1 | 2 | 8 | 107.00 | 110.20 | 109.74 | 109.44 | 3.0% | -0.4% | -0.3% | -0.7% |
| 1 | 2 | 9 | 104.80 | 108.80 | 108.74 | 108.94 | 3.8% | -0.1% | 0.2% | 0.1% |
| 1 | 2 | 10 | 105.30 | 109.20 | 108.54 | 109.04 | 3.7% | -0.6% | 0.5% | -0.1% |
| 2 | 3 | 11 | 96.50 | 103.70 | 103.87 | 104.27 | 7.5% | 0.2% | 0.4% | 0.6% |
| 2 | 3 | 12 | 105.50 | 109.50 | 109.84 | 110.63 | 3.8% | 0.3% | 0.7% | 1.0% |
| 2 | 3 | 13 | 98.10 | 103.20 | 102.78 | 103.48 | 5.2% | -0.4% | 0.7% | 0.3% |
| 2 | 3 | 14 | 99.52 | 103.60 | 103.77 | 104.37 | 4.1% | 0.2% | 0.6% | 0.7% |
| 2 | 4 | 15 | 97.90 | 101.30 | 101.29 | 102.28 | 3.5% | 0.0% | 1.0% | 1.0% |
| 2 | 4 | 16 | 102.20 | 108.40 | 108.25 | 109.14 | 6.1% | -0.1% | 0.8% | 0.7% |
| 2 | 4 | 17 | 95.40 | 100.90 | 100.39 | 101.19 | 5.8% | -0.5% | 0.8% | 0.3% |
| 2 | 4 | 18 | 100.90 | 106.90 | 105.96 | 107.65 | 5.9% | -0.9% | 1.6% | 0.7% |
| 3 | 5 | 19 | 100.70 | 105.90 | 105.56 | 105.86 | 5.2% | -0.3% | 0.3% | 0.0% |
| 3 | 5 | 20 | 94.20 | 103.00 | 102.58 | 103.67 | 9.3% | -0.4% | 1.1% | 0.7% |
| 3 | 5 | 21 | 98.00 | 105.90 | 105.36 | 105.46 | 8.1% | -0.5% | 0.1% | -0.4% |
| 3 | 5 | 22 | 97.50 | 105.00 | 105.07 | 105.36 | 7.7% | 0.1% | 0.3% | 0.3% |
| 3 | 6 | 23 | 95.50 | 106.30 | 104.57 | 104.67 | 11.3% | -1.6% | 0.1% | -1.5% |
| 3 | 6 | 24 | 94.30 | 105.60 | 104.37 | 104.47 | 12.0% | -1.2% | 0.1% | -1.1% |
| 3 | 6 | 25 | 93.20 | 104.30 | 102.88 | 104.07 | 11.9% | -1.4% | 1.2% | -0.2% |
| 3 | 6 | 26 | 92.90 | 105.20 | 104.07 | 103.77 | 13.2% | -1.1% | -0.3% | -1.4% |
| Media | Tutti i moduli | | 101.1 | 106.5 | 106.0 | 106.5 | 5.5% | -0.4% | 0.5% | 0.1% |
| | Campo 1: box 1-2 | | 106.6 | 109.0 | 108.6 | 108.9 | 2.3% | -0.4% | 0.3% | 0.0% |
| | Campo 2: box 3-4 | | 99.5 | 104.7 | 104.5 | 105.4 | 5.2% | -0.2% | 0.8% | 0.7% |
| | Campo 3: box 5-6 | | 95.8 | 105.2 | 104.3 | 104.7 | 9.8% | -0.8% | 0.3% | -0.5% |

Figura 29: Potenze @ STC dei 26 moduli di riferimento, misurate nel 2002, 2003, e 2004. Valori dei singoli moduli, valori medi e suddivisione per campo.

| Campo | Box | N° mod | MISURE 2002 @ STC | | | DIFFERENZE | | |
|--------------|-----|--------|-------------------|-------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | P1 [W] | P2 [W] | P3 [W] | Δ P1,P2 % | Δ P2,P3 % | Δ P1,P3 % |
| | | | moduli sporchi | pulizia con acqua | pulizia con detergente | | | |
| 3 | 5 | 21 | 98 | 105.9 | 106.5 | 8.1% | 0.6% | 8.7% |
| 3 | 5 | 22 | 97.5 | 105 | 106.3 | 7.7% | 1.2% | 9.0% |
| 3 | 6 | 23 | 95.5 | 106.3 | 108 | 11.3% | 1.6% | 13.1% |
| 3 | 6 | 24 | 94.3 | 105.6 | 106.4 | 12.0% | 0.8% | 12.8% |
| 3 | 6 | 25 | 93.2 | 104.3 | 106.1 | 11.9% | 1.7% | 13.8% |
| 3 | 6 | 26 | 92.9 | 105.2 | 106.8 | 13.2% | 1.5% | 15.0% |
| Media | | | 95.2 | 105.4 | 106.7 | 10.7% | 1.2% | 12.1% |

Figura 30: Potenza @ STC dei sei moduli di riferimento (21-26) puliti anche con detergente speciale: confronto tra le misure prima e dopo la pulizia.

| | Valori dichiarati fabbricanti | MISURA 2002 @ STC | | MISURA 2003 @ STC | MISURA 2004 @ STC |
|--|-------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | P1 moduli sporchi | P2 pulizia con acqua | P4 pulizia con acqua | P5 pulizia con acqua |
| P_n moduli [W] | 119.7 | 101.1 | 106.5 | 106.0 | 106.5 |
| P_n campo stimata [kW] | 103.42 | 87.3 | 92.0 | 91.6 | 92.0 |
| Δ rispetto P_n dichiarata | | -15.6% | -11.0% | -11.4% | -11.0% |

Figura 31: Stima della potenza @ STC del campo e differenze rispetto a P_n dichiarata, a partire dalla potenza media dei moduli di riferimento (misure 2002, 2003 e 2004). N° totale di moduli: 864 (72 x 12)

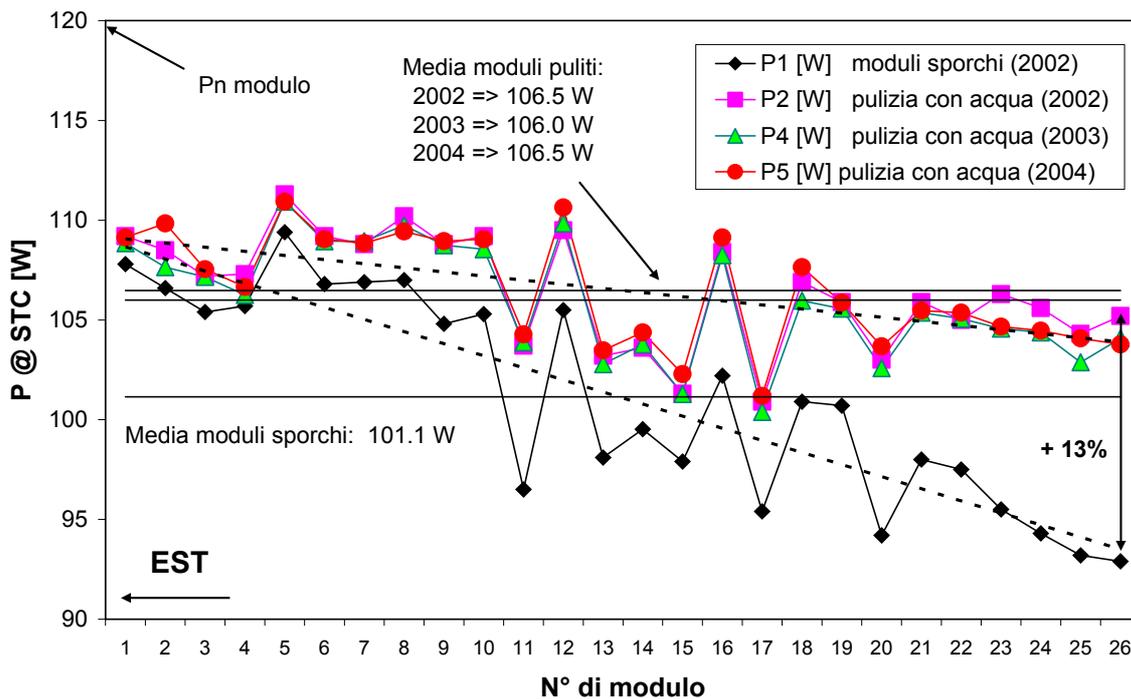


Figura 32: Potenze @ STC dei 26 moduli di riferimento in funzione della loro posizione fisica, misurate nel 2002, 2003 e 2004. Il modulo n° 1 si trova a est.

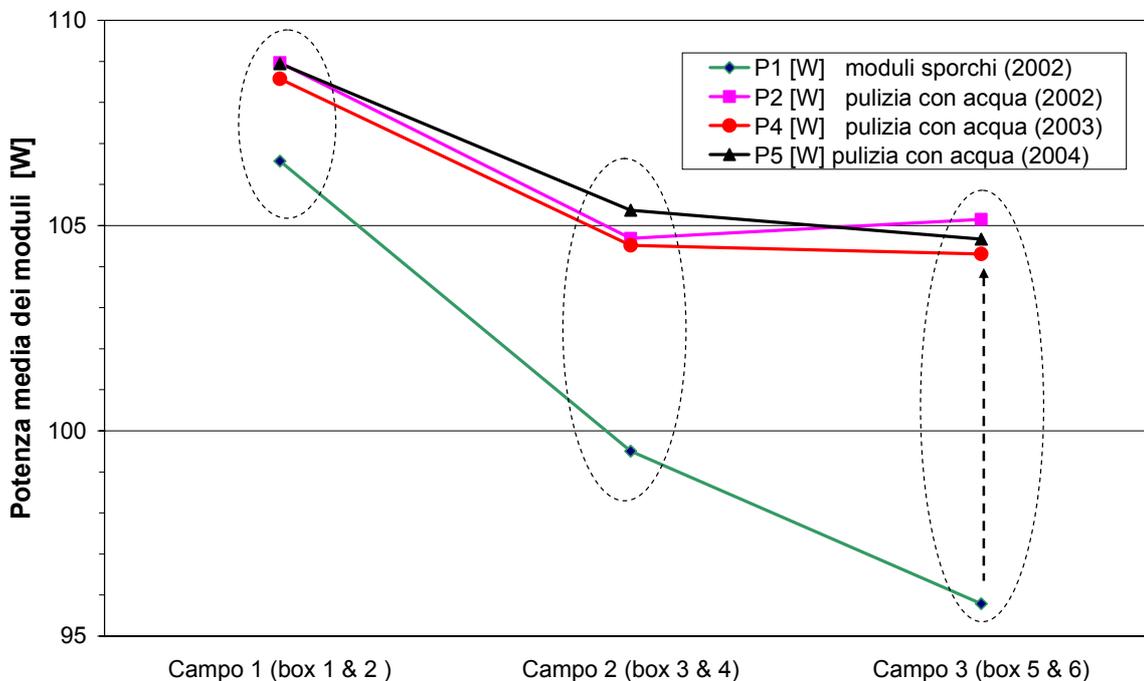


Figura 33: Potenze @ STC dei moduli di riferimento, misurate nel 2002, 2003 e 2004. Dati raggruppati per campo.

4.1.2. Isc e Fill Factor (FF) @ STC

Corrente di cortocircuito (Isc):

La Figura 34 riporta la corrente di cortocircuito (Isc) a STC dei moduli di riferimento, misurata nel 2002, 2003 e 2004. Come le potenze, anche le correnti di cortocircuito mediamente sono rimaste stabili ($\Delta I_{SC} 2002-2004 = 0.7\%$), dopo una diminuzione nel primo anno rispettivamente un aumento nel secondo. Le differenze da un anno all'altro di questi valori sono contenute, comunque maggiori rispetto a quelli della potenza. La tendenza al rialzo di Isc che si nota tra il 2003 e il 2004, del 1.1%, è dovuta verosimilmente alla pulizia dell'intero impianto. I valori sono comunque molto vicini alla precisione del simulatore solare sulle misure di ripetibilità ($\pm 1\%$).

| N° modulo | Isc [A] @ STC | | | DIFFERENZE (%) | | |
|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | $\Delta 2002-2003$ | $\Delta 2003-2004$ | $\Delta 2002-2004$ |
| 1 | 3.535 | 3.527 | 3.563 | -0.2% | 1.0% | 0.8% |
| 2 | 3.552 | 3.540 | 3.609 | -0.3% | 1.9% | 1.6% |
| 3 | 3.441 | 3.437 | 3.458 | -0.1% | 0.6% | 0.5% |
| 4 | 3.410 | 3.400 | 3.408 | -0.3% | 0.2% | -0.1% |
| 5 | 3.532 | 3.525 | 3.541 | -0.2% | 0.5% | 0.3% |
| 6 | 3.504 | 3.492 | 3.517 | -0.3% | 0.7% | 0.4% |
| 7 | 3.501 | 3.499 | 3.522 | -0.1% | 0.7% | 0.6% |
| 8 | 3.539 | 3.525 | 3.545 | -0.4% | 0.6% | 0.2% |
| 9 | 3.490 | 3.493 | 3.522 | 0.1% | 0.8% | 0.9% |
| 10 | 3.487 | 3.472 | 3.510 | -0.4% | 1.1% | 0.7% |
| 11 | 3.340 | 3.347 | 3.373 | 0.2% | 0.8% | 1.0% |
| 12 | 3.537 | 3.546 | 3.587 | 0.3% | 1.1% | 1.4% |
| 13 | 3.285 | 3.280 | 3.308 | -0.2% | 0.9% | 0.7% |
| 14 | 3.342 | 3.360 | 3.381 | 0.5% | 0.6% | 1.2% |
| 15 | 3.335 | 3.338 | 3.379 | 0.1% | 1.2% | 1.3% |
| 16 | 3.493 | 3.464 | 3.527 | -0.8% | 1.8% | 1.0% |
| 17 | 3.289 | 3.285 | 3.307 | -0.1% | 0.7% | 0.6% |
| 18 | 3.426 | 3.406 | 3.468 | -0.6% | 1.8% | 1.2% |
| 19 | 3.493 | 3.459 | 3.516 | -1.0% | 1.6% | 0.6% |
| 20 | 3.299 | 3.288 | 3.355 | -0.3% | 2.0% | 1.7% |
| 21 | 3.407 | 3.391 | 3.420 | -0.5% | 0.9% | 0.4% |
| 22 | 3.440 | 3.418 | 3.469 | -0.6% | 1.5% | 0.8% |
| 23 | 3.407 | 3.342 | 3.376 | -1.9% | 1.0% | -0.9% |
| 24 | 3.396 | 3.348 | 3.400 | -1.4% | 1.5% | 0.1% |
| 25 | 3.362 | 3.342 | 3.372 | -0.6% | 0.9% | 0.3% |
| 26 | 3.373 | 3.320 | 3.373 | -1.6% | 1.6% | 0.0% |
| Media | 3.431 | 3.417 | 3.454 | -0.4% | 1.1% | 0.7% |

Figura 34: Corrente Isc @ STC dei moduli di riferimento. Misure 2002, 2003 e 2004 e differenze in percento.

Fill Factor (FF):

Tra il 1995 e il 1998 i moduli vennero sostituiti in quanto mostravano una bassa potenza ma, in particolare, un $FF < 58\%$. Allo stato attuale il campo non presenta questo problema: infatti, per i moduli di riferimento misurati a STC è stato osservato che:

- il FF è compreso tra il 71.1% e il 73.7%
- il FF medio è del 72.5%
- la pulizia con acqua non fa variare il FF. Dopo la pulizia il FF medio è del 72.6%
- i moduli a ovest hanno un FF leggermente inferiore

4.1.3. Curve IV @ STC

La Figura 35 riporta le curve IV, prima e dopo la pulizia, di un modulo di riferimento particolarmente sporco. Emerge chiaramente come l'aumento di potenza a seguito della pulizia sia dovuto ad un aumento di corrente.

Alcuni moduli misurati indoor a STC presentano delle anomalie.

Il modulo di riferimento no. 19, pur avendo una potenza di 105.77W (media delle 3 misure), presenta una curva IV anormale (vedi Figura 36) visibilmente "irregolare", probabilmente dovuta a celle difettose o ad un mismatch nella serie di celle. Pure il modulo n° 25 presenta un'anomalia nella curva IV, ma l'effetto è meno visibile. Tutti gli altri moduli misurati hanno invece una curva IV dalla forma standard (vedi Figura 37), rimasta praticamente invariata nel corso delle tre misure (le differenze da un anno all'altro rientrano nell'errore di misura).

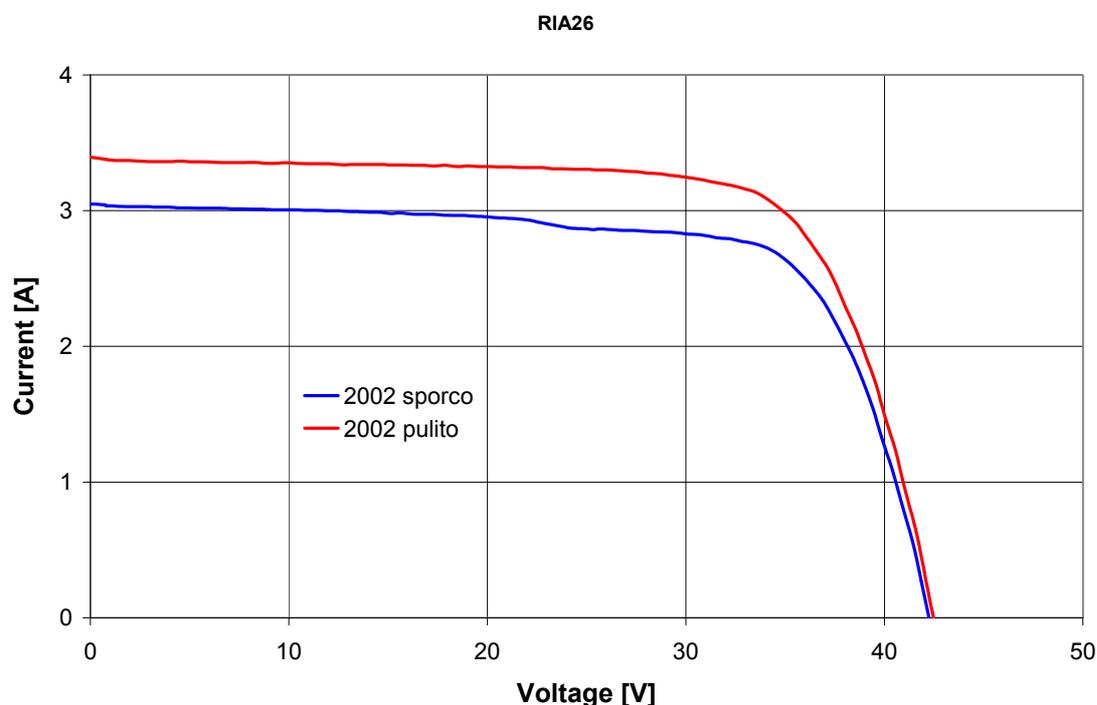


Figura 35: Curva I-V @ STC del modulo di riferimento n° 26 prima e dopo la pulizia (misura 2002). La potenza aumenta del 13.2 %

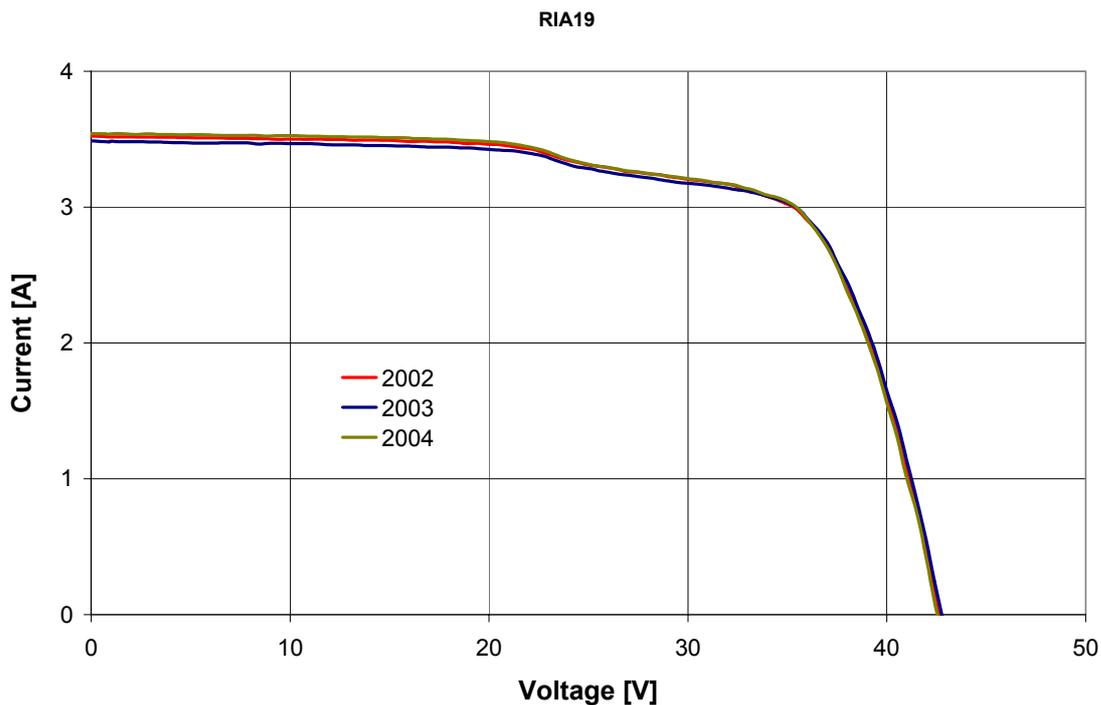


Figura 36: Curva I-V @ STC anomala del modulo di riferimento n° 19 (misure 2002, 2003 e 2004)

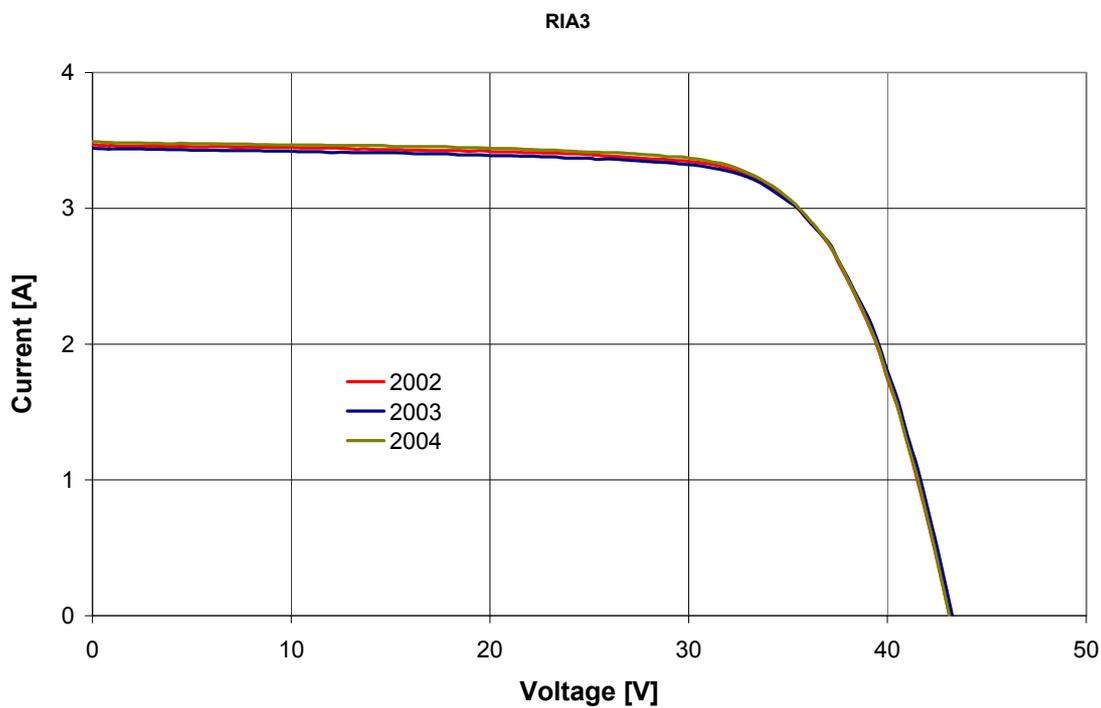


Figura 37: Curva I-V @ STC del modulo di riferimento n° 3 (misura 2002, 2003 e 2004). Questo modulo si comporta come la maggior parte dei moduli di riferimento misurati.

4.2. Analisi termografica

4.2.1. Introduzione

Con queste termografie si intende principalmente misurare le differenze relative di temperatura per scoprire eventuali mal funzionamenti di moduli o serie oppure scoprire punti caldi particolari (hot spots).

Le misure sono effettuate mediante una camera termografica con una precisione relativa (o sensitività termica) $< 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ e una precisione assoluta di $\pm 2 \%$. Nella misura della temperatura assoluta infatti, sono da considerare molteplici parametri quali: riflessioni del vetro, angolo di misura, umidità, temperatura ambiente e emissività della superficie misurata.

L'impianto è suddiviso fisicamente in 72 sottocampi di supporto e ogni sottocampo di supporto comprende 2/3 di stringa (12 moduli). Per ragioni pratiche sono state effettuate due misure per sottocampo di supporto vale a dire 1 misura ogni 6 moduli (in totale 144 misure).

4.2.2. Influenza delle scatolette di collegamento (terminal box)

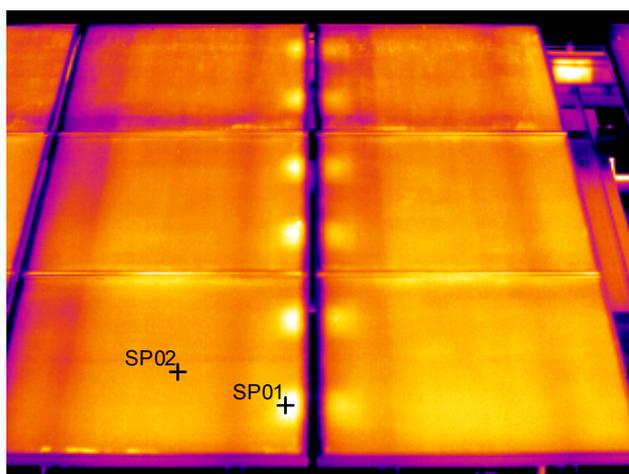


Figura 38: Foto termografica del 51° sottocampo, moduli di destra, stringa N°34 (5.2)

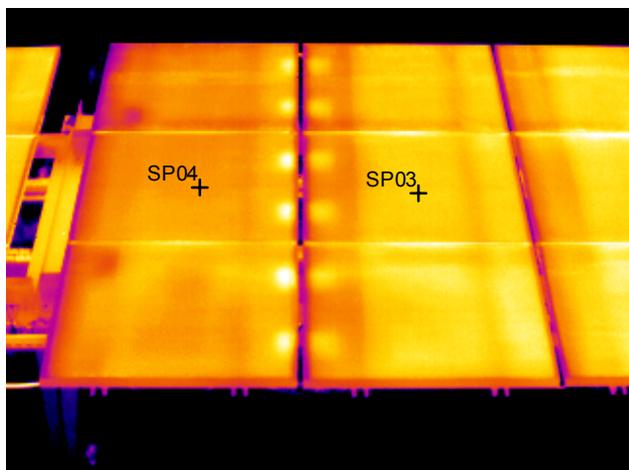
| IR information | Value |
|---------------------|---------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:56:45 |
| File name | E0907-101.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 54.4°C |
| SP02 | 48.7°C |

Dalla **Figura 38** si nota bene dove sono posizionate le scatolette di collegamento (terminal box) poste sul retro dei moduli.

Queste scatolette di collegamento limitano il raffreddamento per convezione e quindi le superfici del modulo (o le celle), poste sopra di esse, risultano più calde. In questo caso constatiamo una temperatura di circa 54°C e una differenza relativa di circa 6°C rispetto al resto del modulo.

Notoriamente le terminal box generano un surriscaldamento locale trascurabile.

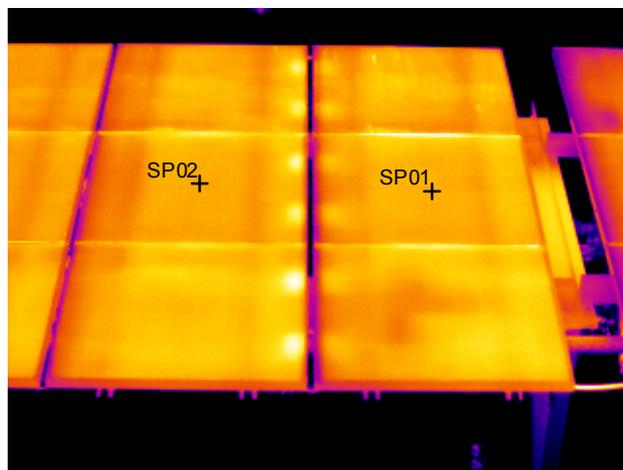
4.2.3. Distribuzione della temperatura



| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:44:45 |
| File name | E0907-56.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 47.2°C |
| SP02 | 44.2°C |

Figura 39 :

Temperatura della superficie dei moduli verticalmente centrali del 28° sottocampo, moduli di **sinistra**, stringa N°19 (3.3).



| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:44:36 |
| File name | E0907-55.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 47.3°C |
| SP02 | 47.0°C |

Figura 40 :

Temperatura della superficie dei moduli verticalmente centrali del 28° sottocampo, moduli di **destra**, stringa N°19 (3.3).

Distribuzione della temperatura in un sottocampo di supporto:

Come si nota nelle due figure risulta che i moduli sono leggermente più caldi sulla sinistra del sottocampo di supporto (vista frontale). Siccome fanno parte della stessa serie e quindi percorsi dalla stessa corrente e non presentano particolari hot spots, si può attribuire questa differenza ad una diversa ventilazione o circolazione d'aria sul retro dei moduli. Come si può leggere nelle tabelle questa differenza è di circa 3 gradi (SP03 e SP04). Questa variazione è stata notata in quasi tutti i sottocampi, vedi Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Distribuzione della temperatura lungo l'intero impianto:

È stata misurata la temperatura di ogni modulo, verticalmente centrale, su tutta la lunghezza dell'impianto come per l'esempio di Figura 39 e Figura 40. Tutte le 288 misure per ogni delle **tre termografie** sono state raccolte nei grafici seguenti :

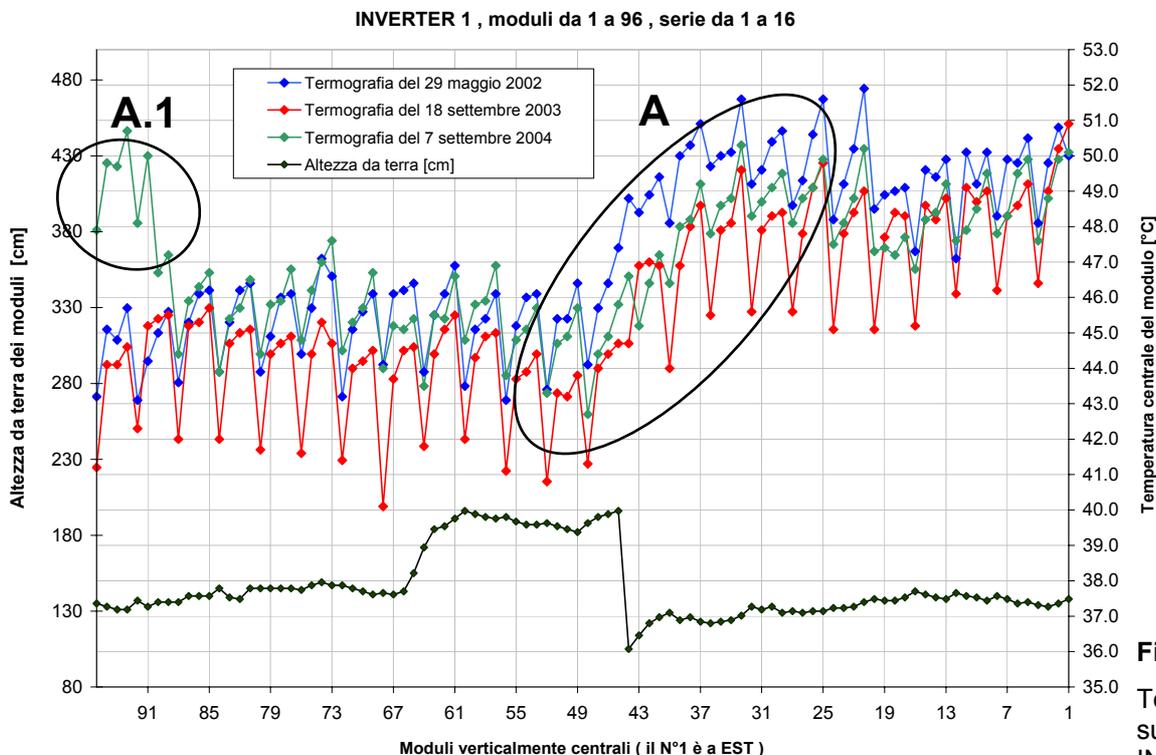


Figura 41 :
Temperatura della superficie dei moduli, INVERTER 1

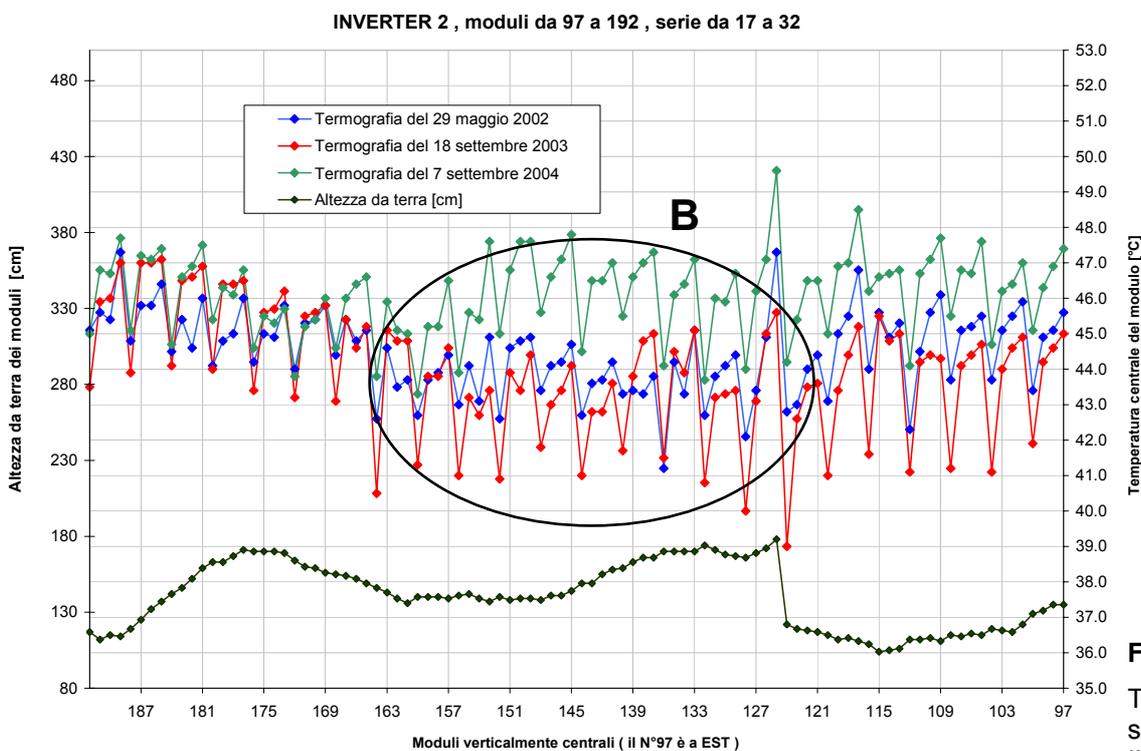
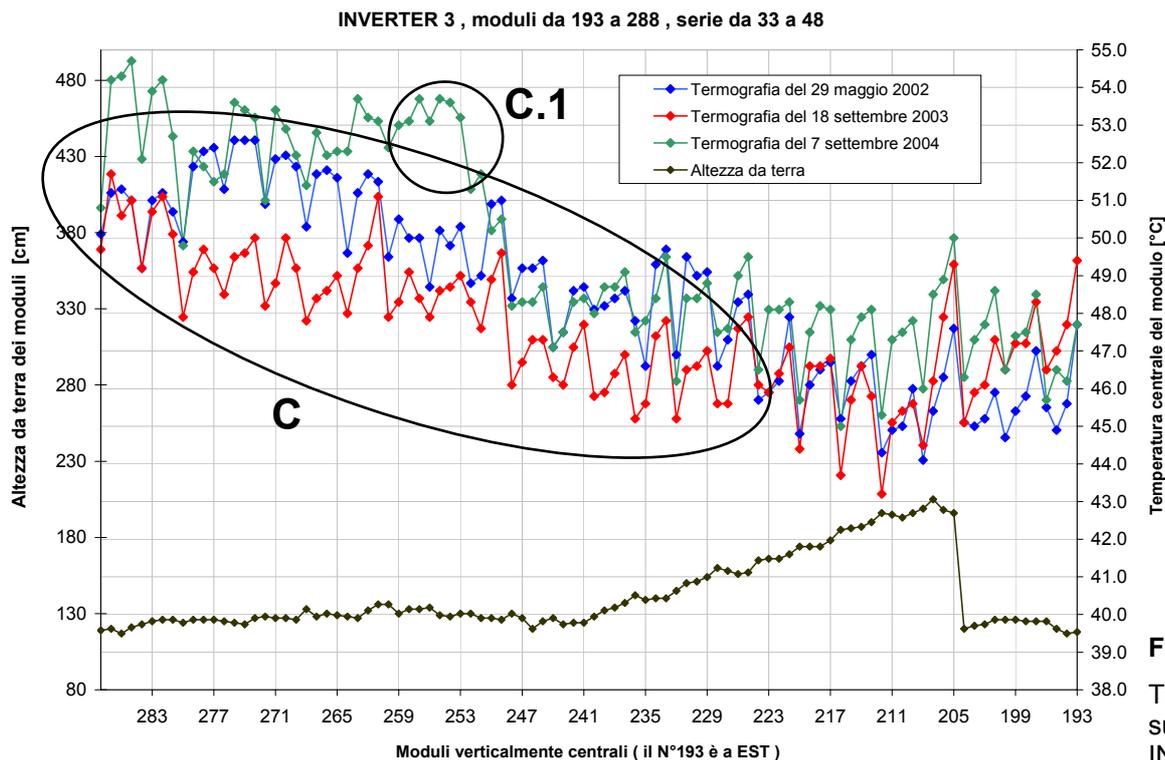


Figura 42 :
Temperatura della superficie dei moduli, INVERTER 2

**Figura 43**

Temperatura della superficie dei moduli, INVERTER 3

La conformazione del terreno varia sulla lunghezza dell'impianto. La traccia nera nei grafici indica l'altezza dei moduli da terra o meglio la distanza tra il terreno e il bordo inferiore dei moduli posti più in basso. Alcuni moduli sono più rialzati dal terreno rispetto ad altri. Certi moduli si trovano, per esempio, più al riparo da certe correnti d'aria.

Nella zona cerchiata **A** (ad est, inverter 1) si può notare uno sbalzo di temperatura dei moduli. Questo sbalzo di temperatura è in corrispondenza di un rialzamento del terreno che limita la circolazione d'aria dei moduli più ad est, infatti i moduli dal 44° via decrescendo sono poco rialzati rispetto al terreno.

Dopo la pulizia dei moduli nell'estate 2003 si nota come la temperatura dei moduli prevalentemente posizionati ad ovest, comparata con l'andamento della temperatura di tutti i moduli, sia diminuita leggermente (vedi zona cerchiata **C**). Nell'ultima termografia del 2004 sembra però che nell'andamento delle temperature vi sia un nuovo aumento. Da ispezione visiva si nota che i moduli si sono ancora sporcati e che i moduli in alto non sono stati probabilmente puliti a sufficienza e ora sono più sporchi di prima, creando rialzi di temperatura delle serie e creando punti caldi nei moduli (hot spots vari, vedi pagine seguenti).

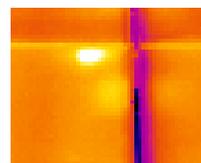
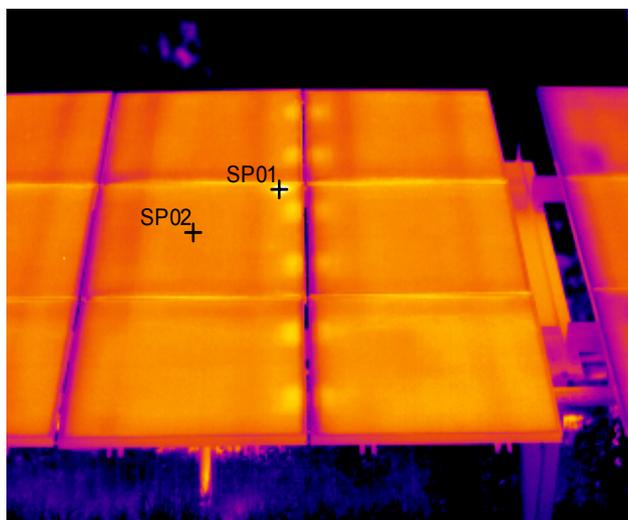
Nell'ultima termografia del 7 settembre 2004 (grafico verde) si nota che nella serie N°16 dell'inverter 1 (2.8) (zona cerchiata **A.1**) e nella serie N° 43 dell'inverter 3 (6.3) (zona cerchiata **C.1**) la temperatura dei moduli è superiore alle altre di circa 3 gradi in media e questo particolare non era presente nelle prime due termografie. Probabilmente queste serie presentano un difetto o non stanno producendo corrente in modo ottimale, durante il normale servizio di manutenzione verranno fatte delle misure elettriche accurate per accertare l'esatta causa di questo presunto malfunzionamento delle serie.

Nella parte centrale dell'impianto dalla serie 20 alla 25 (3.4 alla 4.1) si nota che nell'ultima termografia le temperature sono leggermente maggiori rispetto all'andamento delle altre parti dell'impianto (zona cerchiata **B**).

4.2.4. Moduli con hot spots

Su un totale di 864 moduli sono stati trovati solamente una decina di moduli con delle celle, o parti di celle, con hot spot (surriscaldamenti locali) di una certa importanza.

Un'altra decina di moduli presentano dei leggeri hot spot (differenza di temperatura < 6-7°C).



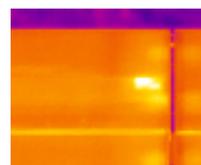
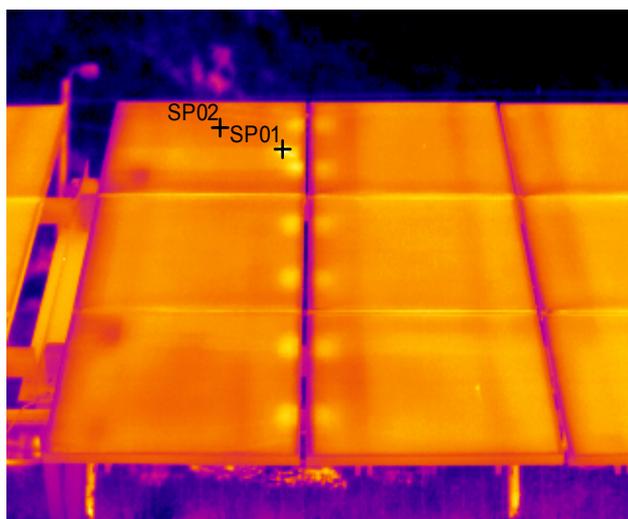
| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:40:40 |
| File name | E0907-37.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 72,4°C |
| SP02 | 47,1°C |

Figura 44: hot spot nel 19° sottocampo, moduli di **destra**, stringa N° 13 (2.5)

Questa figura mostra una cella più calda (in alto a destra, del modulo centrale).

La differenza di temperatura di questo hot spot rispetto alla temperatura del modulo è di circa 25°C.

Questo **forte hot spot** non era presente nelle precedenti termografie del 29.05.2002 e del 18.09.2003.



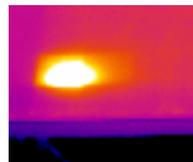
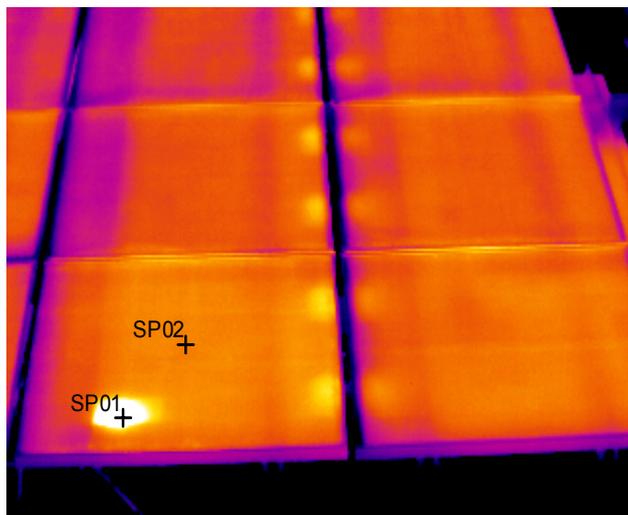
| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:40:53 |
| File name | E0907-38.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 60,5°C |
| SP02 | 42,5°C |

Figura 45: hot spot nel 19° sottocampo, moduli di **sinistra**, stringa N° 13 (2.5)

Questa figura mostra una cella più calda (modulo in alto a sinistra).

La differenza di temperatura di questo hot spot rispetto alla temperatura del modulo è di circa 18°C !

Questo **forte hot spot** era già presente nella precedente termografia del 18.09.2003.



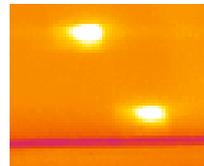
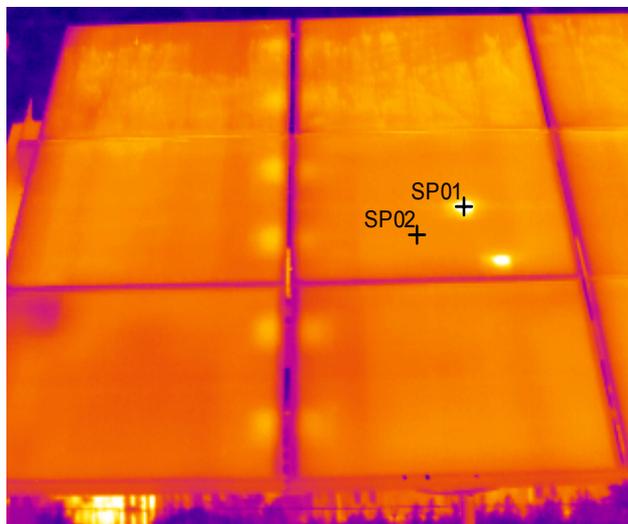
| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:54:22 |
| File name | E0907-93.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 146,7°C |
| SP02 | 49,4°C |

Figura 46: hot spot nel 47° sottocampo, moduli di destra, stringa N° 31 (4.7)

Questa figura mostra una cella caldissima (in basso a sinistra, del modulo in basso a sinistra).

La differenza di temperatura dell'hot spot rispetto alla temperatura del modulo è di quasi **100°C**.

Questo **forte hot spot** era già presente, in forma molto leggera, nella precedente termografia del 18.09.2003.



| IR information | Value |
|---------------------|---------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 14:02:31 |
| File name | E0907-118.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 89,4°C |
| SP02 | 48,2°C |

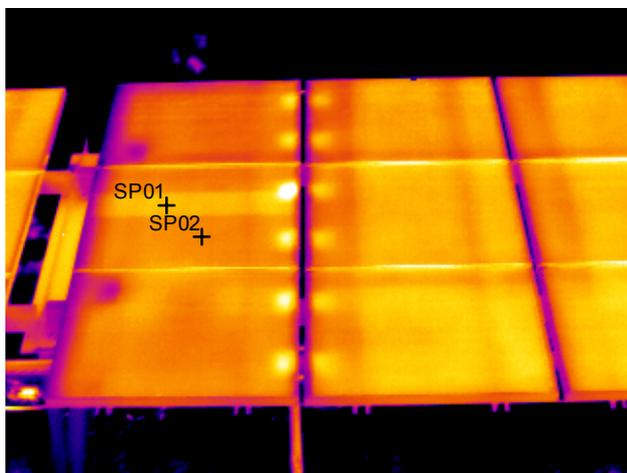
Figura 47 : hot spots nel 59° sottocampo, moduli di sinistra, stringa N° 40 (5.8)

Questa figura mostra delle celle molto calde, si tratta in questo caso di forti hot spot.

La differenza di temperatura di questi hot spot rispetto alla temperatura del modulo è di circa **40°C**.

Questi **forti hot spot** non erano presenti nelle precedenti termografie del 29.05.2002 e del 18.09.2003.

4.2.5. Moduli con mal funzionamenti

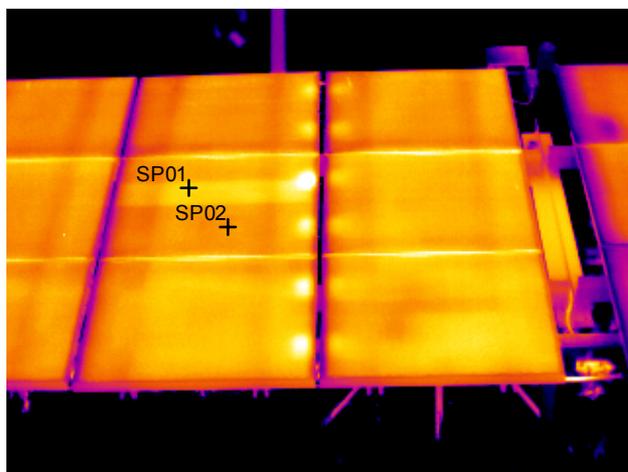


| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:39:45 |
| File name | E0907-32.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 46,0°C |
| SP02 | 43,3°C |

Figura 48 : Modulo con mal funzionamento nel 16° sottocampo, moduli di sinistra, stringa N° 11 (2.3)

Anche questa figura mostra una delle quattro sotto-serie di celle (4x18 celle) del modulo MSX120 che è di circa 3 gradi più calda rispetto alle altre . Verosimilmente la sotto-serie di 18 celle è interrotta e la corrente scorre nel diodo di by-pass oppure il diodo di by-pass è inserito al contrario.

Questo "malfunzionamento" era già presente nella precedente termografia del 18.09.2003.



| IR information | Value |
|---------------------|--------------|
| Date of creation | 07/09/2004 |
| Time of creation | 13:40:17 |
| File name | E0907-35.img |
| Object parameter | Value |
| Emissivity | 0,80 |
| Object distance | 5,0 m |
| Ambient temperature | 26,0°C |
| Label | Value |
| SP01 | 48,4°C |
| SP02 | 45,3°C |

Figura 49 : Modulo con mal funzionamento nel 18° sottocampo, moduli di destra, stringa N° 12 (2.4)

Anche questa figura mostra una delle quattro sotto-serie di celle (4x18 celle) del modulo MSX120 che è di circa 3 gradi più calda rispetto alle altre . Verosimilmente la sotto-serie di 18 celle è interrotta e la corrente scorre nel diodo di by-pass oppure il diodo di by-pass è inserito al contrario.

Questo "malfunzionamento" era già presente nella precedente termografia del 18.09.2003.

4.2.6. Risultati e commenti

- Sono state effettuate tre termografie, la prima il 29 maggio 2002 , la seconda il 18 settembre 2003 e la terza il 7 settembre 2004.
Le condizioni climatiche erano molto simili per tutte e tre le giornate, vale a dire: giornate con cielo limpido, temperatura dell'aria mite e senza vento.
- La maggior parte degli hot spot sono stati riscontrati in tutte e tre le misure.
Nell'ultima termografia del 7.09.2004 si sono riscontrati ulteriori nuovi hot spot, soprattutto nella parte ovest dell'impianto dove i moduli sono molto sporchi.
- In alcuni casi si sono trovati dei forti, o addirittura fortissimi, hot spot. Nella Figura 46 viene mostrato un fortissimo surriscaldamento di una cella che raggiunge una temperatura assoluta maggiore di 140°C e una differenza di temperatura, rispetto al resto del modulo, di circa **100°C**. Questa cella rischia fortemente di rompersi a corto termine.
- Sono stati inoltre riscontrati una decina di moduli con dei leggeri hot spots (con differenza di temperatura < 6-7°C).
- Nel tempo le celle o parti dei celle , affette da forti hot spots , potrebbero danneggiarsi o rompersi.
Nel corso del 2003 tutti i moduli sono stati puliti ma non risultano grandi differenze tra il "prima pulizia" e il "dopo pulizia". Dall'ultima termografia risulta chiaramente come i moduli posti in alto dell'impianto non siano stati puliti bene e dopo essersi ulteriormente sporcati un po' di più durante il corso del 2004 ora cominciano a creare piccoli problemi termici formando degli hot spot.
- Un modulo rotto è stato sostituito (sottocampo 64, stringa 43 (6.3)) prima di effettuare la terza termografia.
- Sette moduli presentano una delle quattro sotto-serie di celle (4x18 celle) che sono di circa 3 - 3,5 gradi più calde rispetto alle altre. Verosimilmente queste sotto-serie di 18 celle sono interrotte e la corrente scorre nei rispettivi diodi di by-pass.
Nel sottocampo 40 , stringa 27 (4.3) si nota un leggero surriscaldamento di una delle quattro sotto-serie di celle (4x18 celle) che nelle precedenti termografie del 29.05.2002 e del 18.09.2003 non era presente (nel frattempo si è probabilmente verificata una rottura di una o più celle nella sotto-serie).
- Dal punto di vista dei surriscaldamenti locali (hot spots) o dal punto di vista di parti di impianto parzialmente non funzionanti l'impianto è da considerarsi in buone condizioni, una **pulitura di tutti** i moduli è comunque **auspicabile** in quanto permetterebbe un incremento della produzione ed eviterebbe la formazione di hot spot nei moduli sporchi.

4.3. Misura I-V outdoor

4.3.1. Potenze e curve IV

Durante il periodo di monitoraggio sono state effettuate tre campagne di misura outdoor delle 48 stringhe di moduli componenti l'impianto. La prima misura I-V outdoor è stata eseguita il 20 febbraio 2003, la seconda il 18 settembre 2003 e la terza l'8 novembre 2004.

Per ogni misura si è tenuto conto dell'irraggiamento istantaneo reale sul piano dei moduli (G_i) e della temperatura back of module (T_{bom}) di un modulo della stringa misurata.

È noto che i moduli dell'impianto sono stati montati e cablati in ordine di potenza decrescente, ovvero nella prima stringa a est sono stati montati i moduli con potenza maggiore via via fino all'ultima stringa più a ovest costituita da moduli con potenza minore. Anche durante la sostituzione dei moduli difettati nel 1995 e 1996 (vedi rapporto finale di risanamento "Erneuerung der PV-Anlage Riazzino – MARK II / AET III", N°39971), si è tenuto conto del montaggio per ordine di potenza dei moduli. Le tre misure sono state analizzate e riunite su un unico grafico (Figura 50) tenendo conto della correzione a STC (Standard Test Conditions). Nelle curve I-V outdoor delle stringhe e nel grafico riassuntivo si nota bene la diminuzione di potenza in funzione del posizionamento delle stringhe stesse da est a ovest. Inoltre, a causa di vari fattori, già discussi nel rapporto di risanamento sopraccitato, più ci si sposta verso il lato ovest dell'impianto e più i moduli sono sporchi. Questa sporcizia, sebbene in modo minore, influisce ulteriormente sulla potenza dei moduli e di conseguenza sulla produzione di energia (per dettagli vedi Capitolo 5).

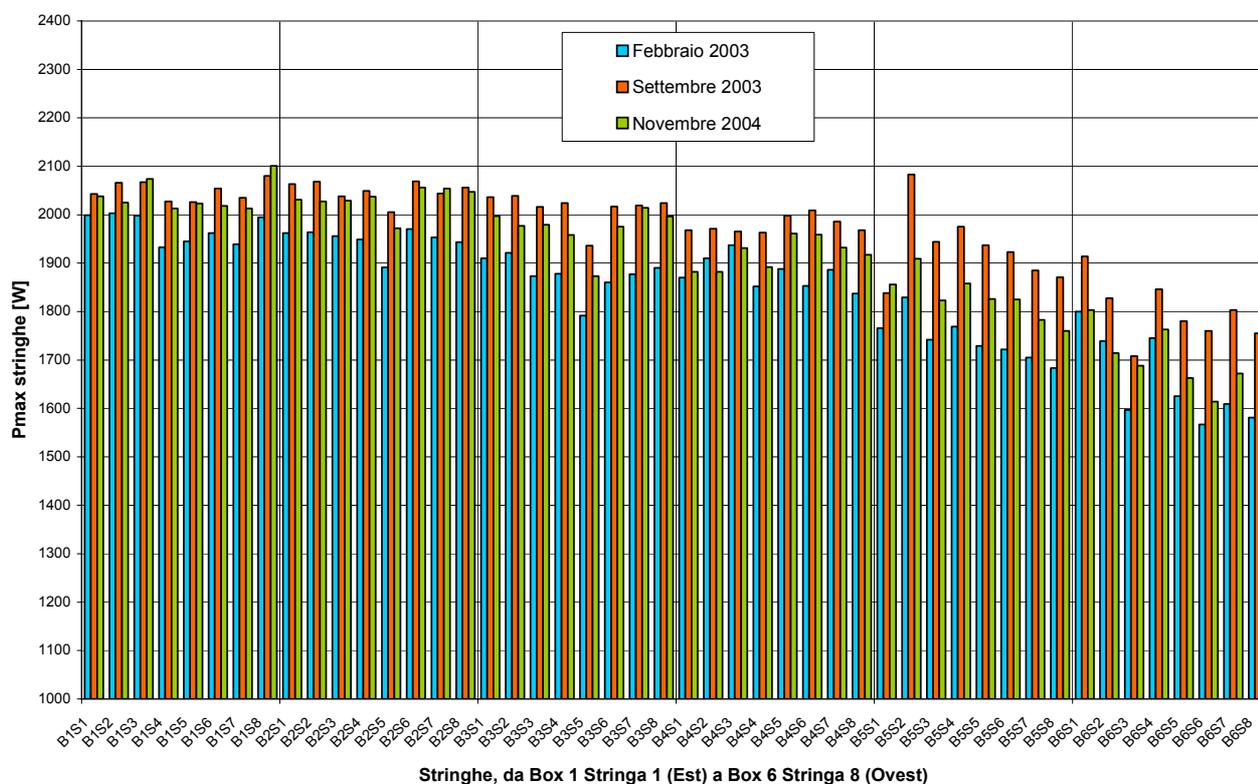


Figura 50 : Pmax @STC delle 48 stringhe dell'impianto, per le tre misure effettuate

Qui di seguito alcune curve I-V corrette @STC in dettaglio mostranti caratteristiche differenti.

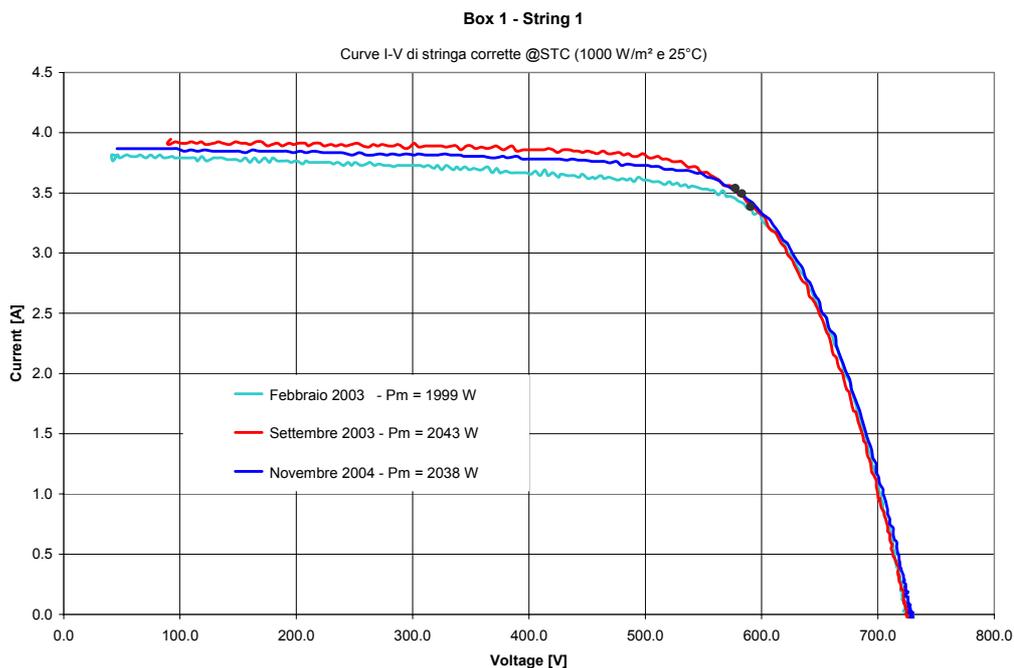


Figura 51 : Curva I-V corretta @STC della stringa 1 del Box 1 (stringa 1 dell'inverter 1 , 1° stringa, tutta ad est)

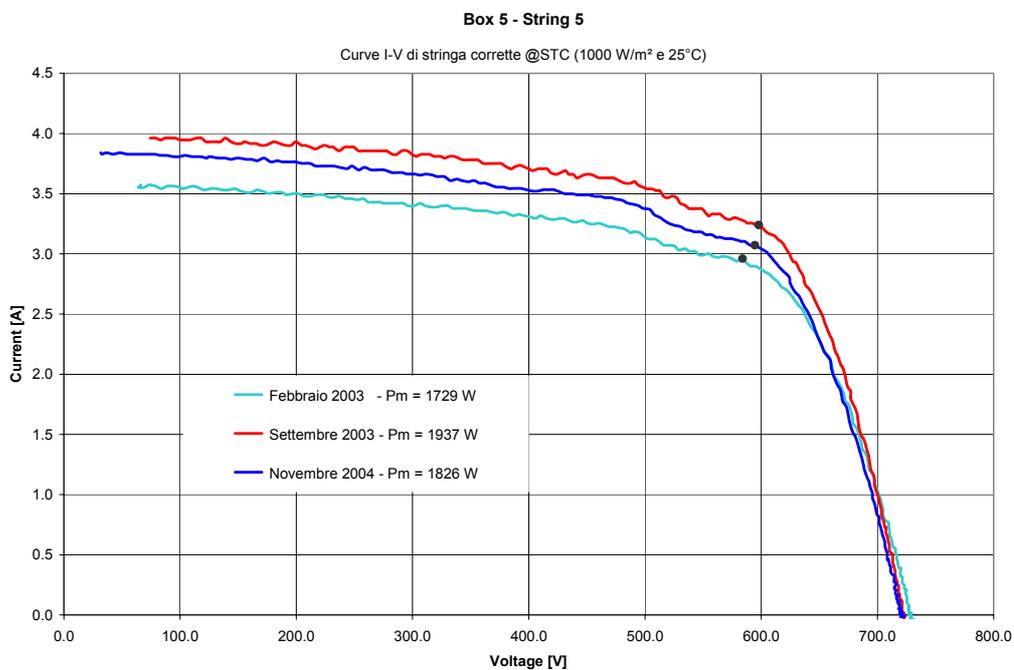


Figura 52 : Curva I-V corretta @STC della stringa 5 del Box 5 (stringa 5 dell'inverter 3 , 37° stringa, parte ovest)

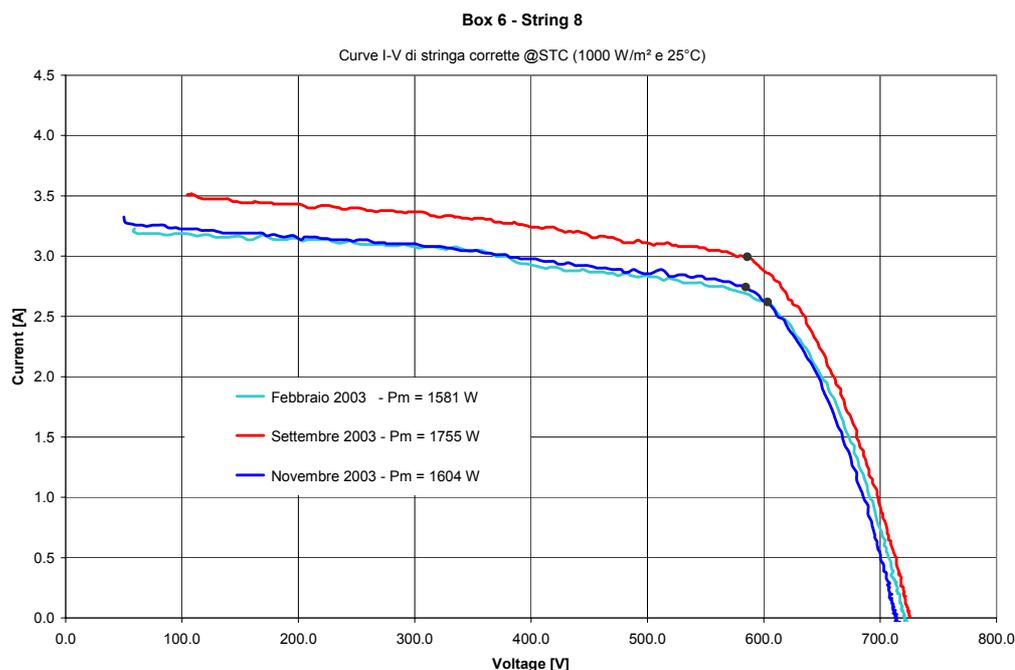


Figura 53 : Curva I-V corretta @STC della stringa 8 del Box 6
(stringa 16 dell'inverter 3 , 48° ed ultima stringa, tutta ad ovest)

4.3.2. Risultati e commenti

- Nel corso della primavera 2003, alcuni mesi prima delle misure outdoor del 18 settembre 2003, tutti i moduli dell'impianto sono stati puliti con acqua. Dal grafico delle curve I-V di stringa (Figura 50) si nota come le potenze di stringa, misurate in settembre 2003 siano mediamente superiori del 6% circa rispetto alla media delle misure di febbraio 2003. Questo aumento è sicuramente dovuto alla pulizia dei moduli ma va comunque analizzato in maniera indicativa in quanto l'apparecchiatura per la misura della curva I-V è data con tolleranze di errore dell'ordine del +/- 5%. L'apparecchiatura per la misura della curva I-V è stata comunque utilizzata in modo analogo e metodico per tutte e tre le misure e con condizioni climatiche reali simili, quindi questa tolleranza di errore di misura dovrebbe risultare verosimilmente più ridotta (stimata in +/- 3% circa).

Purtroppo, come indicano le ultime misure di curva I-V delle stringhe effettuate nel novembre 2004 e da ispezione visiva, i moduli della parte Ovest dell'impianto si sono di nuovo parzialmente sporcati vedi grafici della Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

- Alcune curve I-V indicano inoltre che nella stringa misurata ci sono problemi su uno o più moduli che la compongono. Per esempio la stringa n°5 dell'inverter 3 (Box5 - String5), vedi Figura 52, indica un malfunzionamento di uno o più moduli della stringa. Non si tratta necessariamente di un problema elettrico ma potrebbe essere dovuto anche a forte sporcizia e/o ombreggiamenti parziali di celle. Dall'analisi termografica della stringa in questione risulta la presenza di hot spots con differenza di temperatura rispetto al resto del modulo di circa 6°C. I moduli con questi hot spots sono posizionati in alto e risultano abbastanza sporchi.

- Dall'analisi dei dati risulta la potenza totale @STC dell'impianto:

| | | |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1° misura di febbraio 2003 | Pdc max @STC = 88.60 kW | (moduli sporchi) |
| 2° misura di settembre 2003 | Pdc max @STC = 94.58 kW | (dopo pulizia moduli) |
| 3° misura di novembre 2004 | Pdc max @STC = 91.84 kW | (moduli parzialmente sporchi) |

La **media** delle tra misure : **Pdc max @STC = 91.68 kW**

- I risultati ottenuti dalle misure IV outdoor (misure puntuali) collimano con quelli del monitoraggio delle stringhe (misure in continuo). Infatti le stesse differenze relative osservate in Figura 50 tra le potenze delle stringhe si ritrovano tra le rispettive correnti (vedi Figura 28, correnti dc delle 48 stringhe, a 1'000W/m²).
- I risultati ottenuti dalle misure IV outdoor collimano anche con quelli ottenuti dalle misure @ STC dei moduli di riferimento (vedi cap. 4.1). Infatti la potenza @ STC di 91.7 kW del campo stimata a partire da queste misure (vedi sopra) differisce solo del 1.5 % rispetto a quella ricavata a partire dalle misure IV indoor (90.3 kW, vedi Figura 31).

5. Manutenzione impianto

5.1. Pulitura dei moduli

L'impianto è situato lungo una linea ferroviaria e la presenza di pulviscolo ferroso, sollevato dal passaggio e dalle frenate dei treni, intacca i moduli sporcandoli, soprattutto nella parte ovest dell'impianto, in direzione della stazione ferroviaria di Riazino-Cugnasco. Dalle misure indoor di un campione di 26 moduli, scelti lungo tutta la lunghezza dell'impianto, si è notato che pulendo bene i moduli con semplice acqua si può stimare un recupero della potenza di circa il 5% in media su tutto l'impianto. Per i moduli più sporchi, quelli per esempio collegati all'inverter n° 3, parte ovest dell'impianto, si può stimare addirittura un recupero di potenza di circa un 10% in media.

Nel corso della primavera 2003, alcuni mesi prima delle misure outdoor e termografiche del 18 settembre 2003, tutti i moduli dell'impianto sono stati puliti con acqua. Dai dati mensili di produzione (come dai grafici) si nota un leggero miglioramento del PR. Dal grafico delle curve I-V outdoor si nota come le potenze di stringa, misurate in settembre 2003 siano mediamente superiori del 6% circa rispetto alla media delle misure di febbraio 2003. Questo aumento è sicuramente dovuto alla pulizia dei moduli ma va comunque analizzato in maniera indicativa in quanto l'apparecchiatura per la misura delle curve I-V è data con tolleranze di errore dell'ordine del +/- 5%.

Ipotizzando un utilizzo della citata apparecchiatura con metodologie d'impiego ripetitiva e con condizioni climatiche reali simili questa tolleranza di errore di misura dovrebbe risultare comunque più ridotta (stimata in +/- 3% circa).

Purtroppo, come indicano le ultime misure di curva I-V delle stringhe effettuate nel novembre 2004, i moduli della parte ovest dell'impianto si sono di nuovo parzialmente sporcati vedi grafici del capitolo 4.3.

Persino dalle foto termografiche traspare come questi moduli siano nuovamente sporchi e addirittura il modo in cui erano stati puliti (si nota la traccia del passaggio dell'attrezzo di pulizia, dove è stato passato con più cura e viceversa).

In conclusione, analizzando i fatti sopra elencati, da un punto di vista sia tecnico che di resa economica sarebbe auspicabile una pulizia dei moduli della parte ovest (Inverter 3) almeno una volta ogni 2 anni e una pulizia di tutti i moduli almeno una volta ogni 3 anni.

5.2. Sostituzione moduli rotti

Durante il risanamento dell'impianto (2001) sono stati sostituiti 4 moduli che presentavano la rottura del vetro e che, sebbene ancora parzialmente funzionanti, limitavano la corrente di serie.

Nel 2003 si è trovato un modulo con il vetro rotto, probabilmente da una sassata. Nell'autunno 2003 questo modulo è stato sostituito.

Durante le misure dell'8 novembre 2004 si è purtroppo scoperto che il medesimo modulo, sostituito un paio di mesi prima, presentava il vetro nuovamente rotto (vandalismo mirato?).

Il modulo verrà sostituito nuovamente durante la prossima imminente campagna di manutenzione.

5.3. Atti di vandalismo

Nel complesso, gli atti di vandalismo perpetrati ai danni dell'impianto sono stati molto contenuti e soprattutto di lieve gravità.

Alcuni moduli sono stati presi di mira con sassi e/o altri oggetti che ne hanno causato la rottura del vetro di copertura. Come già indicato nel sottocapitolo precedente un modulo appena sostituito è stato nuovamente trovato con il vetro rotto solo un paio di mesi dopo.

A causa della posizione parzialmente nascosta alla popolazione, l'impianto è stato preso di mira dagli sprayers. Il locale tecnico, contenente gli inverter e le apparecchiature di misura, è stato più volte "sprayato" e susseguentemente riverniciato. Malgrado questa continua esecuzione di graffiti murali va dato atto agli autori dell'aver perlomeno risparmiato il pannello dimostrativo-illustrativo esterno e la finestra in vetro cemento. Finora non si è riscontrato nessun altro tipo di danno al locale tecnico.

In quattro anni di attività presso l'impianto solo un paio di moduli sono stati imbrattati di pittura spray.

Alcune foto illustranti i disegni degli sprayers :



Figura 54 e Figura 55: atti vandalici, graffiti eseguiti da sprayers

6. Conclusioni

Considerazioni generali:

- L'impianto fotovoltaico da 100 kWp AET III (ex MARKII) collegato alla rete è stato messo in funzione alla fine del 1992 e sin dall'inizio è stato monitorato con un ampio sistema di acquisizione dati integrato. È situato lungo il tracciato ferroviario Bellinzona-Locarno e sfrutta un sedime non altrimenti utilizzabile.
- Nel 2001 il LEEE è stato incaricato del suo risanamento, della manutenzione, e della rimessa in servizio dell'acquisizione dati. Il vecchio ondulatore da 100kW è stato sostituito con tre ondulatori da 33kW ciascuno, e parte del cablaggio è stato rifatto.
- Ancora una volta l'ondulatore si è dimostrato la parte più inaffidabile dell'impianto. Il risanamento di questo impianto ha mostrato che già durante la fase di progettazione di un nuovo impianto si deve tener conto della sostituzione dell'ondulatore.
- È stato costruito un locale tecnico rialzato da terra, per contenere le apparecchiature ed evitare problemi alle parti elettrico-elettroniche in caso di esondazione del Lago Maggiore.
- L'impianto ristrutturato è operativo da dicembre 2001, e il nuovo sistema d'acquisizione dati, che è stato adattato alla configurazione attuale, è in funzione dal 26 febbraio 2002.
- Con il presente progetto si è voluto monitorare accuratamente per tre anni il comportamento dell'impianto a seguito del suo risanamento, tramite una campagna di misura dettagliata (misure in continuo), nonché misure annuali puntuali.
- Il progetto si è concluso il 31.12.2004. Tutti gli obiettivi fissati (vedi cap. 1.3) sono stati raggiunti. In futuro - su mandato dell'Azienda Elettrica Ticinese (AET), proprietaria dell'installazione - si prevede di continuare a rilevare i dati di base (sistema d'acquisizione dati principale), al fine di verificarne il buon funzionamento e di continuare a trasmettere il contributo annuale alla Banca Dati dell'IEA.

Misure in continuo:

- A seguito dei lavori di risanamento effettuati dal LEEE nel 2001, l'impianto funziona correttamente.
- Il suo PR supera ora il 70 % anche a bassi irraggiamenti - già a partire da 65 W/m^2 - e raggiunge il massimo attorno a $350\text{-}550 \text{ W/m}^2$
- Con un'insolazione di $6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{d}$ (giornate frequenti), l'indice Yf è buono: $4.24 \text{ kWh/kWp} \cdot \text{d}$
- Il PR e il Yf sono superiori rispetto a quelli degli scorsi anni, quando l'impianto non era ancora stato risanato: i valori medi attuali corrispondono a quelli che per molti anni sono stati valori di picco.
- Nel corso dei tre anni di monitoraggio, l'impianto ha erogato rispettivamente $95'977 \text{ kWh}$ (2002), $115'322 \text{ kWh}$ (2003) e $108'492 \text{ kWh}$ (2004), superando per due volte consecutive i 100 MWh/a , soglia mai raggiunta negli 11 anni di funzionamento precedenti. La produzione annua attesa, a seguito del risanamento, era di $95\text{--}100 \text{ MWh}$.
- Ciò è dovuto alle condizioni meteo favorevoli, ma anche all'ottimo funzionamento dei nuovi ondulatori. Il numero annuo di ore di funzionamento dei nuovi ondulatori è superiore rispetto al passato.
- Dalla sua messa in funzione (1992) l'impianto ha prodotto $1'012,941 \text{ MWh}$, per un tempo totale di funzionamento degli ondulatori di $34'426 \text{ h}$ (31.12.2004).
- Durante una bella giornata l'impianto produce ca. 500 kWh ; negli ultimi tre anni la produzione giornaliera massima è stata di 563 kWh , mentre quella media di 299 kWh .
- Per il PR medio annuo valgono le medesime considerazioni fatte per la produzione di energia: dalla messa in funzione dell'impianto, solo negli ultimi due anni è stato superato il valore limite del 70%, con 71% nel 2003 rispettivamente 72% nel 2004. Nel periodo precedente il risanamento, il PR annuo medio era stato del 59.7%, pur tralasciando nel calcolo gli anni '92, '00 e '01 caratterizzati dal funzionamento parziale dell'impianto.
- Analogamente, negli ultimi tre anni l'indice di produzione Yf è stato di 823, rispettivamente di $1'103$

e 1'037 kWh/kWp.a (per il 2002 mancano i primi due mesi di monitoraggio). Il miglior indice registrato in passato era stato quello del 1999, di 935 kWh/kWp.

- La potenza dc effettiva erogata dai moduli non ha mai superato gli 82.4 kW ed è stata compresa tra 80 e 85 kW solamente per lo 0.2 % del tempo. Quindi la potenza nominale dc dichiarata (103.42 kW) non è mai stata raggiunta, addirittura l'impianto non ha mai superato l'80% di questo valore. Analogamente, la potenza totale massima ac effettivamente raggiunta è stata $P_{ac_{max}} = 76.1\text{kW}$, valore molto vicino alla soglia in cui gli ondulatori vanno in limitazione. Ciò dimostra che gli ondulatori dell'impianto AETIII sono dimensionati correttamente rispetto alla potenza disponibile.
- Il rendimento degli ondulatori è elevato (raggiunge il 95%) e corrisponde a quello dichiarato dal fabbricante. A partire dai 200 W/m^2 è sempre compreso tra il 92% e il 95%; i valori massimi sono raggiunti tra 300 e 500 W/m^2 . Il rendimento europeo ponderato vale 93.7%.
- Tutte le 48 stringhe (6x8) funzionano correttamente. Tuttavia le stringhe del box 1 (est) producono più di quelle del box 6. A $1'000\text{ W/m}^2$ tutte le stringhe del box 1 producono ca. 3.2 Adc, mentre nessuna stringa del box 6 produce più di 3 Adc. I box 2 a 5 si situano, in termini di efficienza, tra i box 1 e 6.
- Ci sono inoltre differenze tra le varie stringhe dello stesso box. Per il box 1 queste differenze sono minime e la corrente di ogni stringa è praticamente proporzionale all'irraggiamento; spostandosi verso ovest le differenze tra le stringhe aumentano sempre più, cioè la relazione lineare $I_{dc} = \alpha \cdot G$ diventa viepiù imprecisa, ovvero la dispersione dei dati aumenta.
- Tra i dati rilevati con il sistema di acquisizione LEEE-TISO e quelli rilevati dagli ondulatori della ditta Sputnik vi è una lieve differenza (differenza media $E_{tot\ ac} = 2.8\%$).

Misure annuali:

- La potenza media @ STC dei 26 moduli di riferimento (puliti con acqua) è di 106.3 W. Nel corso dei tre anni i moduli non sono degradati.
- I moduli a ovest sono meno potenti di quelli a est. Essi sono stati installati volutamente in questo modo (triage) per limitare le perdite di mismatch. La potenza del modulo n° 26 (modulo più a ovest) è inferiore rispetto a quella del modulo n° 1 del 13.8% (moduli sporchi) rispettivamente del 4.3 % dopo pulizia con acqua.
- Inoltre i moduli a ovest sono più sporchi di quelli a est, a causa della prossimità della stazione ferroviaria. Dopo pulizia, la potenza @ STC è salita in media del 5.5%, e per i moduli più sporchi del 12.1%.
- Estrapolando la potenza media @ STC dei moduli di riferimento, la potenza totale stimata @ STC del campo con i moduli sporchi è di **87.3 kW**; pulendo tutti i moduli, la potenza totale dovrebbe salire a **91.9 kW**. Questo valore è comunque ancora inferiore dell'11.2% rispetto a quello dichiarato.
- La pulizia dell'intero impianto con acqua è giustificata, in quanto dovrebbe comportare un aumento di produzione di ca. $5'000\text{kWh/a}$; una pulizia con prodotti speciali non è necessaria.
- Sono stati trovati pochi hot-spots, ma con un'elevata temperatura (ΔT fino di $+100^\circ\text{C}$). In totale sono stati individuati solamente quattro moduli con malfunzionamenti, e uno con il vetro rotto ma ancora funzionante. L'impianto non presenta tuttavia particolari problemi dal profilo termico.
- La conformazione del terreno sottostante incide in modo importante (ventilazione) sulla temperatura di funzionamento: i moduli alle estremità del campo hanno temperature superiori, rispetto a quelli al centro, fino a 10°C .
- Dalle misure I-V outdoor delle stringhe si nota bene la diminuzione di potenza in funzione del posizionamento delle stringhe stesse da est a ovest. Da queste misure si ricava una stima della potenza totale @ STC dell'impianto di **91.7 kW**.
- I risultati ottenuti dalle misure IV outdoor collimano sia con quelli del monitoraggio delle stringhe (medesime differenze relative) sia con quelli ottenuti dalle misure @ STC dei moduli di riferimento (medesima stima della potenza totale del campo)

Confronto con gli altri impianti in Ticino:

- Il PR è simile a quello degli altri impianti collegati alla rete in Ticino; sarebbe del 79% se si calcolasse utilizzando la potenza reale estrapolata dalle misure @ STC dei moduli di riferimento piuttosto che quella nominale dichiarata dal fabbricante.

Diffusione dei risultati: i risultati relativi a questo progetto, finora sono stati diffusi tramite:

- L'organizzazione di manifestazioni quali ad esempio l'inaugurazione dell'impianto; il coinvolgimento di scuole, in particolare tramite visite guidate di scuole medie e professionali.
- Diverse pubblicazioni sulla stampa locale e su media audio-visivi; articoli e posters pubblicati in occasione di simposi e conferenze (vedi [3] e [4]); i rapporti annuali.
- I contributi forniti alla Banca dati IEA

6. Conclusions

General information:

- The AET III 100 kW grid connected PV plant (ex MARKII), came into operation at the end of 1992 and it has always been monitored with a wide integrated data acquisition system. It is located along the Bellinzona-Locarno railway section, and it exploits a land otherwise not usable.
- In 2001 the LEEE was charged with the renewal of the plant, its maintenance and the data acquisition system adaptation and starting up. The old 100kW converter was substituted by three new converters, 33kW each, and part of the wiring was redone.
- Once again the inverter appears as the most unreliable component of the plant. This plant renewal has shown that the substitution of the inverter has to be taken into account since the planning and designing phases of a new plant.
- An elevated technical room was built to hold instrumentation and avoid problems in case of overflowing of Lago Maggiore.
- The renewed plant has been operating since December 2001, while the adapted data acquisition system has been working since the 26th February 2002.
- The aim of this three-year project has been to accurately monitor the plant behaviour following its reorganization by continuous detailed measurements and additional annual controls.
- The project finished on December 31st 2004. All the goals have been achieved (see charter 1.3). In the future, on commission of the Azienda Elettrica Ticinese (AET) – the plant owner, the basic data acquisition is foreseen to continue to check the good plant operation and to pursue the annual data communication to the IEA database.

Continuous monitoring:

- Since its renewal, carried on by LEEE in the year 2001, the plant has been working properly.
- At present its PR is higher than 70 % also at low irradiances – even from 65 W/m² – and it reaches maximum values at 350-550 W/m²
- With an irradiance equal to 6kWh/m2.d (frequent days), the Yf index is good: 4.24 kWh/kWp.d
- PR and Yf are better than the previous years, when the plant was not yet renovated: the current mean values matches the best data reached in the past.
- During three years, the plant produced respectively 95.977 MWh (2002), 115.322 MWh (2003) and 108.492 MWh (2004); the 2003 and 2004 annual productions exceed the limit of 100 MWh/a, data never reached in the 11 previous years of operation. The foreseen annual production after renovation was 95 –100 MWh.
- This is due to the favourable meteorological conditions and, in particular, to the excellent new inverters performance. The number of working hours per year of new inverters is higher than the past.

- From its installation in 2001 up to now the PV plant has produced 1'012,941 MWh, which corresponds to a total inverters operating time of 34'426 hours (31.12.2004).
- In a sunny day the plant produces about 500 kWh; in the last three years the maximum daily production has been 563kWh, while the mean one is 299 kWh.
- Same remarks on energy production are valid for annual mean PR: since the plant installation only in the two last years the limit value of 70% has been exceeded – 71% in 2003 and 72% in 2004. Before the plant renewal the annual mean PR was 59.7%, not including years 1992, 2000 and 2001 characterised by partial functioning of the system.
- Likewise, in the last three years the Yf has been equal to 823, 1'103 and 1'037 kWh/kWp.y respectively (regarding 2002 the two first months data are missing). The best Yf recorded in the past was, in 1999, 935 kWh/kWp.
- The dc power supplied by modules never exceeded 82.4 kW, and remained between 80 and 85 kW only the 0.2% of the time. So the declared dc nominal power (103.42 kW) has never been reached; even the plant never exceeded the 80% of that value. The total ac maximum power ($P_{ac_{max}}$) has been equal to 76.1 kW, which is very close to the inverters limit. This means that the inverters chosen for the AETIII plant have been adequately established with respect to the renovated plant.
- The inverter efficiency is high (it reaches 95%) and corresponds to the one declared by the manufacturer. From 200 W/m² it's always included between 92% and 95%; the maximum values are reached between 300 and 500 W/m². The European weighted efficiency is 93.7%.
- All the 48 strings (6x8) work adequately. Nevertheless, strings of box 1 (east) produce more than the ones of box 6. At 1'000 W/m² all the strings of box 1 produce about 3.2 Adc, while none of the strings of box 6 produces more than 3 Adc. Boxes from 2 to 5 are situated, in terms of efficiency, between boxes 1 and 6.
- There are also differences between strings of the same box. Regarding box 1 these differences are minimum and the current of each string is practically proportional to the irradiance. Shifting to west, differences gradually increase, that is the linear relation $I_{dc}=\alpha \cdot G$ becomes more and more in accurate, or the data dispersion increases.
- There's a slight difference between data recorded with the LEEE-TISO acquisition system and the ones reported by Sputnik inverters (mean difference $E_{tot\ ac} = 2.8\%$).

Annual measurements:

- The mean power @ STC of the 26 reference modules (cleaned with water) is 106.3 W. In three years the modules didn't degrade.
- Modules located on the west side are less powerful than the ones on the east side. They had been intentionally positioned in such a way (trriage) to limit the mismatch losses. The power of the module number 26 (the western one) is 13.8% lower than the power of the module n° 1 before cleaning, and 4.3 % respectively after cleaning with water.
- The modules on the west side are more soiled than the eastern ones, because of their proximity to the railway station. After cleaning the power @ STC increased of about 5.5%, and 12.1% for the most soiled modules.
- Calculating the mean power @ STC of the reference modules, the plant estimated power @ STC with soiled modules is equal to **87.3 kW**; cleaning all the modules, the power should increase up to **91.9 kW**. However this value is still 11.2% lower than the declared one.
- The cleaning with water of the overall plant is justified as it should lead to a production increase of about 5'000kWh/y; a cleaning with special detergent products isn't necessary.
- A few hot spots have been found, but many of them have a high temperature (ΔT up to +100°C). On the whole only four modules have been found defectives, and one with broken glass but still working. The plant doesn't show particular thermal problems.
- The conformation of the ground below considerably affects the plant working temperature (ventilation): modules located at the extremities of the plant – nearest to the ground – show temperatures 10°C higher with respect to the ones in the middle.

- The outdoor strings I-V measurements clearly show a power decrease in relation with strings position from east to west. From these measurements @ STC the estimated power plant is equal to **91.7 kW**.
- Results from outdoor measurements correspond both with the data from strings monitoring (same relative differences), and with the ones from reference modules measurements @ STC (same estimated power plant).

Comparison with other plants in Ticino:

- PR is similar to the ones of the other grid-connected plants in Ticino; it would be equal to 79% if the real power (extrapolated from the reference modules performance measurements), instead of the one declared by the manufacturer, will be used for its calculation.

Spreading of results: results related to this project have been spread by:

- Demonstration like the plant opening, and schools involvement, in particular through guided tours of secondary and trade schools.
- Several publications on local press and audio-visual media participations; papers and posters in occasion of symposium and conferences (see [3] and [4]); annual reports.
- Contribution to IEA database.

7. Collaborazioni nazionali e internazionali

Nel corso del progetto vi è stata collaborazione attiva con l'AET (Azienda Elettrica Ticinese) in particolare per quel che concerne la presenza in loco in qualità di supporto tecnico durante l'inaugurazione, porte aperte, esposizioni, visite, ecc. Nel corso del progetto inoltre il LEEE ha contribuito alla messa a punto del sistema di telelettura dell'AET, mettendo a disposizione particolari dati di funzionamento.

Si è inoltre collaborato con la ditta fornitrice degli ondulatori (Sputnik AG) per il confronto, rispettivamente la calibrazione dei dati di produzione dettagliati e mensili.

Infine si è collaborato con la Task2 del Programma PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme) dell'IEA (International Energy Agency). Al responsabile sono stati trasmessi, annualmente e conformemente al formato stabilito, i dati di funzionamento dell'impianto AET III. Questi dati, unitamente a quelli di altri 395 impianti realizzati a livello internazionale, vengono sistematicamente inseriti nella banca dati IEA PVPS Performance Database, vengono analizzati e sono oggetto di interessanti pubblicazioni (quali ad es. il rapporto "Country reports on PV system performance" realizzato nell'ambito dell' "Activity 2.6").

8. Ringraziamenti

Si ringraziano in particolare l'Ufficio Federale dell'Energia (UFE) e l'Azienda Elettrica Ticinese (AET) che hanno sostenuto finanziariamente il progetto.

9. Referenze e pubblicazioni

- [1] Th. Nordmann, TNC Consulting AG, **100kWp grid-connected PV installation along rail infrastructure in southern Switzerland: monitoring, evaluation, operation and maintenance of plant**, annual reports 1992-1999
- [2] Burà E., Chianese D., Rezzonico S., Travaglini G., **Erneuerung der PV-Anlage Riazzino MARK II – AET III**, rapporto finale progetto BFE 39971, Canobbio, 2002
- [3] Burà E., Chianese D., Rezzonico S., **Recovery of a 100KW PV power plant**, PV in Europe Conference and Exhibition, Roma, October 2002
- [4] Burà E., Chianese D., Rezzonico S., **Impianto fotovoltaico AET III: primi risultati; Risanamento dell'impianto fotovoltaico Mark II (AET III)**, Simposio fotovoltaico nazionale 2002, Canobbio, maggio 2002
- [5] Burà E., Rezzonico S., **Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III a Riazzino**, Rapporti annuali 2002, 2003, 2004, Canobbio
- [6] **Pagine Internet** <http://www.lee.e.supsi.ch>.