

ETAPA III. VALIDAREA ȘI TESTAREA SISTEMULUI INTEGRAT PENTRU CARACTERIZAREA ȘI EVALUAREA PERFORMANTELOR SISTEMELOR PV

Raport științific și tehnic – Etapa a III-a
Proiect SICEPV, contract 62BG/2016

Prezentul raport înglobează realizările și rezultatele specifice celor patru activități științifice și tehnice finalizate în cadrul proiectului SICEPV, contract 62BG/2016, în cadrul etapei a III-a. Toate activitățile prezentei etape au urmărit obiectivele propuse în planul de realizare al proiectului. Activitățile descrise sunt următoarele:

Activitatea III.1- Dezvoltarea de proceduri de calibrare a măsurătorilor în condiții standard de testare

Elaborarea unei proceduri de calibrare a măsurătorilor în condițiile standard de testare (STC): intensitatea radiației solare 1000 W/m², spectrul radiației solare standard definit de masa de aer AM1,5 și temperatura la nivelul celei solare de 20°C.

Activitatea III.2 Analiza, optimizarea și testarea sistemului de caracterizare și evaluare

Analiza și testarea sistemului de caracterizare prin evaluări preliminare a performanțelor unor module PV, a funcționalității în timpul instalării și în faza de funcționare

Optimizarea funcțională a sistemului de caracterizare și evaluare

Activitatea III.3 Validarea sistemului de caracterizare și evaluare

Validarea sistemului de caracterizare și evaluare prin respectarea metodologiilor și standardelor specifice de testare a celulelor și modulelor PV

Activitatea III.4 Organizarea și derularea stagiilor de pregătire practică ale masteranzilor

Organizarea și derularea stagiilor de practică a masteranzilor la ICPE SA.

Livrabile:

1. Articole:

Dragomir F., Dragomir O.E. - *Renewable Energy Monitoring Using Arduino - Android Platform*, Proceedings of the 11th International Workshop of Electromagnetic Compatibility CEM2018, 2018

Olariu N. – Caracterizarea echipamentelor din cadrul centralelor solare PV, Proceedings workshop „Proгноza productiei de energie a centralelor fotovoltaice”, 11 mai 2018

Dragomir F., Dragomir O.E., Olariu N., Oprea A. - *Power Quality Analysis of Grid Connected PV Power System*, Proceedings of the 18th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies, 2018

Dragomir O.E., Dragomir F. - *A Multi-Agent System for Energy Management in an Intelligent Microgrid*, Proceedings of the 18th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies, 2018

2. Prezentare a proiectului și a rezultatelor obținute în cadrul evenimentului *International Electric & Automation Show IEAS 2018*, ce a avut loc la Palatul Parlamentului, București în perioada 18 – 20 septembrie 2018. În cadrul evenimentului s-a prezentat rezultatele obținute în cadrul proiectului .

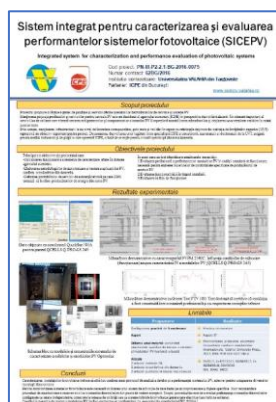


Fig. 1. Prezentarea rezultatelor proiectului în cadrul evenimentului IEAS 2018

Activitatea III.1- Dezvoltarea de procedurii de calibrare a măsurătorilor în condiții standard de testare

1. Introducere

Cea mai vizibilă caracteristică a celulelor fotovoltaice este eficiența lor. De la momentul realizării lor, măsurarea eficienței și a puterii electrice livrate, în condiții de funcționare bine definite, a reprezentat cheia îmbunătățirii performanțelor celulelor solare, prin înțelegerea parametrilor care influențează performanța lor.

Calibrarea este astăzi înțeleasă ca un *proces* pentru determinarea curentului de scurt-circuit a dispozitivelor fotovoltaice, în condiții de referință în ceea ce privește temperatura dispozitivului, nivelul de iradiere și distribuția spectrală.

Deoarece din punct de vedere economic nu este fezabil să se calibreze toate celulele solare sau modulele solare fabricate, cu precizia necesară, în practică se recurge la *celule de referință*, care, odată bine calibrate (caracterizate electric), servesc drept etalon pentru alte celule solare, folosind procedura de măsurare a curentului de scurt-circuit a dispozitivului testat.

Pentru calibrarea celulelor de referință se pot folosi metode sofisticate, care au fost dezvoltate în special din cauza utilizării celulelor solare în aplicații terestre.

Calibrarea de bază se referă la condițiile standard de testare (STC), care definesc o celulă solară aflată la *temperatura* de joncțiune (temperatura joncțiunii p-n care produce efectul fotovoltaic sub acțiunii radiației electromagnetice) de 25°C, expusă la o *iradiere* de 1000 W/m² și o distribuție a spectrului solar corespunzătoare lui AM1.5, care corespunde unui unghi de 37° a poziției soarelui față de nivelul mării.

În timp ce temperatura și iradierea pot fi simulate în laborator, sau se pot efectua măsurători în condiții naturale măsurabile, distribuția spectrală *de referință* nu se poate găsi sub lumina naturală a soarelui. Aproape toate metodele de calibrare au propria abordare caracteristică pentru a lua în considerare această problemă.

Prețul de vânzare al panourilor fotovoltaice este în întregime legat de puterea maximă pe care un panou fotovoltaic o poate livra în condiții standard (STC). Concurența între producători se bazează, în mare parte, pe prețul unui watt-putere. Puterea maximă a modulelor fotovoltaice este stabilită în cadrul sistemelor de control al calității în vigoare și se referă fie la modulele de referință calibrate, fie la *celule de referință* etalonate, plasate împreună cu panoul fotovoltaic testat în planul de măsurare al unui simulator solar.

Pentru a exemplifica relevanța acurateții calibrării panourilor fotovoltaice, se poate da următorul exemplu: presupunând un nivel de vânzări de module fotovoltaice la nivel mondial de 500 MW, o incertitudine globală de calibrare de $\pm 3\%$ ar fi echivalentul unei supra- sau subestimare de ± 15 MW. Pentru un preț mediu de vânzare de 4 euro/watt, această incertitudine se traduce la supra- sau subvânzări de ± 60 milioane euro.

Cerința de bază pe care toate metodele de calibrare dezvoltate până în prezent se străduiesc să o minimizeze, este *incertitudinea* calibrării.

Principalele componente ale incertitudinii sunt:

1. *Eroarea de polarizare* este determinată de îmbătrânirea componentelor electronice ale circuitului de polarizare sau de alinierea necorespunzătoare la sursa de lumină.

2. *Eroarea de precizie* include toate incertitudinile din subsistemele electronice, cum ar fi voltmetrele convertoarele analogice-digitale sau controlul temperaturii.

3. *Eroarea aleatorie* poate fi cauzată, în principiu, de natura aleatorie a atmosferei sau a zgomotului în condiționarea semnalului.

4. *Repetabilitatea*. Aproape orice experiment, când este repetat prezintă variații ușoare, care sunt dincolo de eroarea aleatorie pură. Aceste variații pot fi cauzate de ușoare schimbări în configurația experimentală, de procedura de măsurare, sau chiar prin factori umani. Repetabilitatea nu poate fi niciodată mai bună decât eroarea aleatorie.

La nivel mondial nu există multe laboratoare specializate în calibrarea celulelor solare.

Timpul necesar pentru efectuarea unei calibrări complete, inclusiv analiza și verificarea datelor reprezintă, pe lângă un factor major pentru satisfacerea clientului și factor asociat costurilor forței de muncă. Acești factori pot limita procesul de calibrare la un număr mic de celule.

Un alt factor care poate să influențeze calibrarea este cel legat de celulele de referință folosite, care pot fi realizate cu diferite tehnologii fotovoltaice și care pot să influențeze metoda de calibrare. Ca exemple se pot enunța: răspunsul lent la pulsurile luminoase rapide sau imposibilitatea de a controla temperatura de joncțiune în cazul dispozitivelor de referință realizate din straturi subțiri.

Reducerea *incertitudinii de măsurare* a fost întotdeauna un obiectiv major pentru oamenii de știință și metrologi din diferite discipline. În domeniul fotovoltaic (PV), acest lucru este în mod deosebit de interes pentru oamenii de știință care dezvoltă noi concepte de celule și pentru investitorii în sistemele fotovoltaice. În mod specific, cu cât este mai mare incertitudinea raportată la rezultatul măsurătorii, cu atât este mai evidentă necesitatea unei îmbunătățiri științifice și cu atât riscul financiar este inerent într-o investiție.

Literatura arată că incertitudinea în măsurarea modulelor PV și celulelor s-a îmbunătățit continuu în ultimii ani [1-4]. Evaluarea incertitudinii este adesea prezentată în ceea ce privește măsurătorile apropiate de condițiile STC (1000 W/m², 25°C, distribuție spectrală în conformitate cu IEC 60904-3 [5]). În anii 80, discuția științifică s-a concentrat mai degrabă pe celule fotovoltaice decât pe module fotovoltaice. În anul 2001, Whitfield și Osterwald au publicat o analiză de incertitudine, rezultând 1,9% pentru măsurările modulelor exterioare, în condiții apropiate de STC [4]. Müllejans și colab. au publicat o analiză cuprinzătoare a incertitudinii care a inclus și calibrarea în condiții de interior a modulelor fotovoltaice, în 2009. În această publicație, cea mai bună incertitudine privind *puterea* este raportată la 1,96% pentru modulele cu diagonala mai mică de 2 m. De asemenea, în 2009, Emery a raportat o incertitudine de 3,9% pentru zonele de până la 150 x 120 cm² [1]. Rezultatele sunt comparabile în limitele incertitudinilor, însă nu sunt raportate detalii privind estimările de incertitudine. Valorile tipice de incertitudine pentru eficiența modului sau a submodulului prezentate în tabelele de eficiență a celulelor solare se află într-o

gamă de 2 - 3,5%, în funcție de mărimea și tehnologia dispozitivului. Incertitudinea tinde să fie mai mare pentru tehnologiile care folosesc filme subțiri și pentru dispozitivele mai mari. De reținut este că detaliile calculului de incertitudine menționate mai sus pot fi diferite, deoarece normele acceptate pentru estimarea incertitudinii erau încă în curs de dezvoltare.

În acest material se prezintă progresele realizate pentru reducerea incertitudinii de calibrare a modulelor fotovoltaice pe bază de monocristale (c-Si). În luna martie 2010, cea mai mică incertitudine posibilă pentru modulele c-Si a fost redusă la 2,0% [2] și este în continuare redusă la 1,6%.

Problemele de stabilitate (chimică), în special cele ale modulelor fotovoltaice pe bază de filme subțiri, nu sunt discutate prezentul material.

2. Metodologia de măsurare

2.1. Echipamentul de măsurare

Măsurătorile în condiții de interior se fac cu ajutorul unui simulator de soare (un exemplu de astfel de simulator: Pasaun 3b, clasa AAA conform IEC 60904-9 [6], cu o durată a blitului lămpii de 11,8 ms, din care 9,8 ms sunt utilizabile pentru măsurare; în această perioadă, blițul se află la un nivel stabil, cu o neuniformitate temporală de 0,3% [6]). Foarte importantă este neuniformitatea spațială a radiației. Se poate obține o neuniformitate mai mică de 1% pentru dimensiuni de module fotovoltaice mai mici de 2,2 x 1,1 m², distanța dintre simulator și planul modulului fiind de 8 m.

Sistemul complet de măsurare trebuie să fie situat într-o cameră cu aer condiționat, cu o temperatură ambiantă de 25 ± 1°C. Influențele negative date de reflexiile radiației pot fi minimizate folosind pereți negri și ferestre aflate în tunel, de-a lungul axei optice.

Iradierarea este măsurată cu o celulă de referință, proiectată în conformitate cu WPVS ("Scară Globală Fotovoltaică" (WPVS – acronim în limba engleză)) [7, 8], cu un senzor de temperatură intern Pt100 și un rezistor extern de precizie. Temperatura modulului este măsurată prin intermediul a patru senzori de temperatură Pt100 atașați la partea din spate a modulului. Convertoare de 10 biți A/D direcționează semnalele de temperatură către sistemul de achiziție de date (data acquisition - DAQ). Temperatura este măsurată o dată la începutul fiecărei măsurări a curbei I-V. Sistemul DAQ înregistrează următoarele date: iradierea, curentul modulului și tensiunea (până la 500 de puncte pe o determinare (măsurătoare)) prin intermediul a trei convertoare A/D de 16 biți. Măsurarea este declanșată de software, luându-se în considerare utilizarea doar a părții stabile a blițului lămpii. Tensiunea și curentul sunt măsurate cu o tehnologie cu patru fire în domeniul maxim de ± 250 V și, respectiv, de ± 20 A. Măsurătorile de *histerezis* (istoricul sistemelor fizice) sunt măsurătorile de la I_{SC} la V_{OC} (*înainte*) și de la V_{OC} la I_{SC} (*înapoi*). Acest lucru permite detectarea depășirilor sau subestimărilor legate de capacitatea modulului prin calcularea histerezisului (Ecuția 1) între măsurarea *înainte* și *înapoi*.

$$\text{histerezis} = ((P_{\text{max, \textit{înapoi}}} - P_{\text{max, \textit{înainte}}}) / (P_{\text{max, \textit{înapoi}}} + P_{\text{max, \textit{înainte}}})) \times 100\% \quad (1)$$

2.2. Sistemul de asigurare a calității și lanțul de trasabilitate

Sistemul de asigurare a calității include trei componente importante. În primul rând, se efectuează măsurători regulate ale modulelor fotovoltaice pentru a asigura performanța constantă a sistemului. Aceste măsurători se efectuează timp de trei ori:

- teste internaționale folosind procedura "Round-Robin" (în metodologia experimentală, un test Round-Robin este un test inter-laborator - măsurare, analiză sau experiment - efectuat independent de mai multe ori; acest lucru poate implica mai mulți oameni de știință independenți care efectuează testul, prin utilizarea aceleiași metode cu diferite echipamente sau o varietate de metode și echipamente; în realitate, este adesea o combinație a celor două, de exemplu dacă este analizată o probă sau una (sau mai multe) proprietăți, este măsurată de diferite laboratoare, folosind diferite metode sau chiar prin diferite unități de echipament de aceeași construcție). anual, pentru a compara diferite lanțuri de trasabilitate și metode de măsurare.

- măsurători de asigurare a calității la fiecare trei săptămâni, efectuate pe același set de module fotovoltaice, cu toate simulatoarele, cu scopul de a detecta drifturile pe termen lung și diferențele dintre simulatoare.

- măsurători zilnice de asigurare a calității la începutul și la sfârșitul fiecărei zile lucrătoare, efectuate pe un singur modul, pe fiecare simulator. Scopul este să se detecteze imediat disfuncționalitățile echipamentului, precum și variații în decurs de trei săptămâni.

În al doilea rând, toate echipamentele de măsură utilizate sunt recalibrate o dată pe an. Toate echipamentele electrice și toți senzorii de temperatură sunt calibrați de laboratoarele acreditate. Toate celulele de referință sunt calibrate primar de PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Institutul Național de Metrologie al Germaniei). Calibrarea se face prin raportare la unitățile SI.

În al treilea rând, instrumentele de măsurare dezvoltate in-house sunt utilizate pentru testarea caracteristicilor simulatoarelor. Distribuția spectrală relativă a simulatorului este măsurată cu un spectroradiometru calibrat trasabil la PTB. Instrumentul este un spectroradiometru monocromator. Ansamblul complet de senzori este alcătuit din trei rețele de diode, acoperind împreună un domeniu de lungimi de undă de 280-1700 nm.

Distribuția spectrală este măsurată în fiecare săptămână, pentru a ține evidența modificărilor spectrale datorate îmbătrânirii lămpii. Odată cu creșterea numărului de blitz-uri efectuate cu o lampă, cota NIR (Near Infra Red) a distribuției spectrale crește, în timp ce cota UV (Ultra Violet) scade. Mărimea acestei modificări depinde de calitatea lămpilor și, prin urmare, trebuie monitorizată cu atenție, deoarece afectează *factorul de nepotrivire spectrală* (MM).

Neuniformitatea spațială este, de asemenea, verificată în mod regulat. Acest lucru este important în special pentru a verifica poziția celulei de referință, care trebuie să se afle într-un loc în care iradierea este medie [9]. Măsurătorile sunt efectuate cu ajutorul unui modul special proiectat, cu 4x12 celule, pentru măsurători de neuniformitate. Curentul de scurt-circuit și temperatura fiecărei celule sunt măsurate în paralel, oferind astfel o modalitate rapidă și fiabilă de a examina neuniformitatea iradierii.

Importanța sistemului de asigurare a calității în ceea ce privește incertitudinea de măsurare este de a verifica periodic dacă situația actuală este în conformitate cu limitele stabilite și de a declanșa intervenții în caz de disfuncționalități. De asemenea, poate ajuta la investigarea și cuantificarea efectelor inexplicabile în prezent (în principal: abateri de la rezultatele măsurătorilor așteptate). Incertitudinea este o valoare care "exprimă cât de bine credeți că cunoașteți adevărata valoare reală unică a măsurandului" conform GUM ("Ghidul pentru exprimarea incertitudinii în măsurare", Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) ([10], pag. 3). Pe baza acestui fapt, un sistem sofisticat de asigurare a calității poate scădea incertitudinea, deoarece contribuțiile necunoscute din punct de vedere analitic la incertitudine pot fi estimate în limite mai mici, adică mai puțin conservatoare, după cum ar fi necesar, fără cunoștințele obținute prin măsurători regulate.

3. Procedura de măsurare a unui producător de module fotovoltaice

Măsurătorile urmează recomandările IEC 60904 [5, 9, 22, 23].

Celula de referință este montată în planul modulului fotovoltaic, poziția fiind stabilită în funcție de rezultatele măsurătorilor de neuniformitate, pentru a ne asigura că celula de referință măsoară iradierea medie în planul modulului [9]. Iradierea simulatorului este setată la nivelul pentru care celula de referință incluzând MM indică 1000 W/m². Scopul este de a efectua măsurătorile cu o "iradiere efectivă" (adică iradierea care contribuie efectiv la generarea fotocurentului în dispozitivul testat) cât mai aproape posibil de 1000 W/m², astfel încât dispozitivul testat să producă același fotocurent ca în condițiile standard (STC).

Corecția de nepotrivire spectrală se bazează pe răspunsul spectral (SR) al unui modul fotovoltaic și al unui lot de fabricație, luat ca referință, de același tip ca modulul testat. Răspunsul spectral al unei celule al modulului de referință este măsurat cu ajutorul unor celule fotovoltaice produse de producătorul respectiv, care livrează modulele fotovoltaice (celulele fotovoltaice de referință sunt fabricate în aceeași tehnologie ca și modulele fotovoltaice livrate de producătorul respectiv). Distribuția spectrală relativă a simulatorului este disponibilă din măsurătorile săptămânale.

Pentru fiecare modul testat se efectuează trei măsurători de histerezis. Dacă este necesar, măsurătorile sunt efectuate astfel încât histerezisul conform ecuației 1 să fie mai mic de 0,5%. Datele brute obținute sunt evaluate cu ajutorul unui software dezvoltat in-house. Software-ul este folosit pentru evaluarea curbelor I-V. El corectează curba I-V la condițiile STC punct-cu-punct, în ceea ce privește temperatura și iradierea, printr-o procedură comparabilă cu IEC 60891 [11]. Software-ul mediază curbele *înainte și înapoi* și determină parametrii modulului electric (I_{SC} , I_{Pmax} , P_{max} , V_{Pmax} , V_{OC} , FF (factorul de umplere) și eficiența) din curba medie I-V.

Medierea se realizează punct-cu-punct după interpolarea curbelor *înainte și înapoi* la aceleași valori de tensiune. Valorile I_{SC} și V_{OC} sunt determinate de potrivirea liniară la intervalele selectate de tensiune sau curent ale curbei I-V. Se aplică o potrivire polinomială de ordinul 5 pentru un domeniu de tensiune selectat al curbei P-V în cazul determinării P_{max} . Rezultatul măsurătorii finale este dat de media parametrilor modulului obținută din cele trei măsurători de histerezis.

4. Calibrarea detectoarelor de radiații

Detectoarele de radiații servesc la determinarea energiei solare iradiată, indiferent de distribuția spectrală. Iradierea soarelui este transformată în căldură cu un corp negru absorbant. Creșterea temperaturii în raport cu cea de referință este proporțională cu cea primită datorită iradierii. Temperatura este măsurată cu un număr de termocuple conectate în serie, pentru a măări tensiunea dată de termocuple la niveluri practice de câțiva milivolți.

Detectoarele de radiații sunt diferite în funcție de câmpul lor de detectare. *Piranometrele* au un câmp de detectare emisferic, permițând măsurarea iradierii solare din întreg cerul, în timp ce *pirheliometrele* restricționează câmpul de detectare la 5°. Pentru comparație, unghiul aparent al soarelui este de 0,33°. În consecință, pirheliometrele trebuie să fie montate pe o platformă de urmărire, asigurând alinierea cu poziția soarelui. O clasificare a acestor instrumente este publicată în standardul ISO 19060.

4.1. Piranometrele

Pentru calibrarea piranometrelor se folosește un dispozitiv de umbrire aliniat astfel încât să nu existe o iradiere directă de la soare care să cadă pe suprafața piranometrului. Dispozitivul de umbrire este construit astfel încât geometria sa (diametrul și distanța față de piranometru) să se potrivească cu geometria pirheliometrului. După ce se citește valoarea de iradiere difuză dată de piranometru umbrat, umbrirea este eliminată și se face o citire a iradierii totale. Diferența dintre valoarea totală și cea umbrită corespunde radiației *directe* ca determinată de pirheliometru și stabilită ca valoarea de calibrare a piranometrului. Incertitudinea calibrării este mult influențată de proiectarea dispozitivului de umbrire și liniaritatea piranometrului testat. Standardul ISO 19846 descrie metodele de calibrare, luând în cazul setărilor: una în care piranometrul testat este montat co-planar cu pirheliometrul și alta în cazul în care piranometrul este montat fix pe orizontală, iar dispozitivul de umbrire urmează soarele. Prima metodă este mai simplă mecanic, dar pot fi necesare corecții pentru efectele de la sol.

4.2. Pirheliometrele

Standardul ISO 19059 descrie metoda de calibrare pentru pirheliometre, care trebuie realizată sub lumina naturală a soarelui. Atât instrumentul de calibrat cât și pirheliometrul de referință sunt montate pe o platformă de urmărire a soarelui. Standardul prescrie nivelurile minime de iradiere, precum și date procedura de analiză. Această metodă de măsurare și metoda sa standard are un nivel ridicat pentru întregul lanț de calibrare, pirheliometrul de referință putând fi unul dintre referințele primare sau secundare utilizate în întreaga lume ca referință radiometrică mondială.

Asemenea referințe primare sunt "Radiometrele Practice cu Cavitare Absolută" (PACRAD, acronim în limba engleză), care absorb lumina incidentă pe un corp negru ideal, realizat ca o diafragmă de precizie în fața unei cavități, care de obicei are formă de con cu o suprafață foarte absorbantă. O a doua cavitare, identică, aflată în interiorul aceleiași case este protejată de lumina soarelui și încălzită electric pentru a urmări temperatura primei cavități, care este expusă la lumina soarelui. Energia electrică necesară pentru încălzirea cavității de referință stabilește valoarea de iradiere. Incertitudinea metodei depinde în mare măsură de

constanta de timp a instrumentelor implicate și a intervalelor de citire corespunzătoare, în cazul în care există un compromis între precizie și fluctuația atmosferică.

5. Calibrarea celulelor solare pe bază de siliciu

Celulele solare pe bază de siliciu au răspunsul spectral maxim pentru valori ale lungimii de undă a radiației electromagnetice cuprinsă, aproximativ, între 0,9 μm și 1 μm . În consecință, curentul de scurtcircuit poate varia în funcție de distribuția spectrală relativă.

Distribuția spectrală variază în funcție de condițiile atmosferice. Chiar dacă condițiile corespunzătoare lui AM1.5 pot fi găsite de două ori pe zi, variabilitatea componentei difuze și directe a luminii solare poate prejudicia rezultatele măsurătorilor.

5.1. Simularea luminii soarelui

Această metodă necesită determinarea distribuției spectrale a sursei de lumină în timpul calibrării. Curentul de scurt-circuit al celulei de referință este măsurat concomitant cu iradierea spectrală. Datele de răspuns ale celulei de referință măsurate sunt analizate împreună cu distribuția spectrală a sursei de lumină (vezi punctul 5.3). Dacă există o nepotrivire, prin metoda descrisă la punctul 5.3 se poate efectua un calcul pentru a corecta diferențele între simulator și spectrul standard.

Iradierea absolută în timpul calibrării poate fi derivată fie din calibrarea absolută a iradierii pentru fiecare lungime de undă a spectroradiometrului sau prin folosirea unor termocuple, limitată de filtre la gama de lungimi de undă de spectroradiometrului. Avantajul metodei este că poate fi aplicată pentru orice tehnologie de realizare a celulelor solare, în special atunci când se utilizează un simulator. Sursa de incertitudine majoră este controlul temperaturii celulei solare și calibrarea incertitudinii spectroradiometrului. Pentru o descriere completă a metodei, a se vedea ISO/DIS 15387.

5.2. Lumina naturală a soarelui

5.2.1. Metoda soarelui direct

Această metodă urmează principiul de calibrare al pirheliometrelor, descris în 4.2, cu pirheliometrul de testare înlocuit cu celule solare de referință.

Celulele solare sunt montate cu o cameră de diafragmare apropiată de geometria pirheliometrului de referință. În plus, spectrul radiației directe a luminii soarelui este măsurat pentru a realiza o corecție a nepotrivirii spectrale, necesară răspunsului spectral al celulei solare. În cazul în care condițiilor meteorologice sunt bune și repetabile, factorul de nepotrivire poate fi mic ($< 2\%$) și, mai ales, o constantă pentru măsurători în zile diferite. În acest caz, spectrometrietrul poate fi omis sau înlocuit cu măsurarea lungimilor de undă selective, care permite o modelare pentru a calcula spectrul real al radiației.

Unul dintre principalele dezavantaje ale acestei metode sunt, pe de o parte câmpul de vedere limitat al celulei de referință, care ar putea să nu corespundă unei utilizări ulterioare, cealaltă fiind faptul că spectrul radiației luminii solare directe este diferit față de standardul IEC 60904-3 [5]. În plus, considerațiile practice limitează această metodă la celule solare de referință, mai mici de aproximativ 25 cm^2 . Pentru înregistrarea măsurătorilor trebuie să se ia în considerare timpul determinat de constantele pirheliometrului de referință care sunt cu cel puțin trei ordine mai mici decât ale unei celule solare.

5.2.2. Metoda "Global Sunlight"

Această metodă este o adaptare a calibrării piramometrului descrisă în 4.1. Celula pe bază de siliciu, de referință, este montată pe un dispozitiv de urmărire a direcției soarelui împreună cu un piranometru și un pirheliometru. Piramometrul este umbrat astfel încât să poată măsura numai componenta difuză a luminii solare, cea directă fiind dată de pirheliometru. Metoda evită principalul dezavantaj al metodei soarelui direct și poate beneficia de o potrivire mai apropiată de cea a distribuției spectrale cu spectrul de referință standard. Dacă condițiile atmosferice sunt selectate cu grijă, se poate atinge repetabilitate ridicată chiar și fără măsurarea iradierii spectrale.

5.3. Calibrarea răspunsului spectral. Răspunsul absolut

Calibrarea răspunsului spectral se bazează pe faptul că valoarea de calibrare a unei celule solare poate fi calculată pentru orice distribuția spectrală solară de referință, dacă răspunsul absolut pentru fiecare lungime de undă este cunoscut. Toate metodele pentru răspunsul spectral se bazează pe curentul de scurt-circuit măsurat al celulelor solare expuse la lumină (aproape) monocromatică cu lungimi de undă cunoscute. Acest lucru se poate realiza prin folosirea filtrelor unui monocromator, intercalate între sursa de lumină și celulele solare. Cu toate acestea, deoarece intensitatea radiației luminii filtrate este mică (numărul de fotoni pe unitate de timp și suprafață este de până la trei ordine de mărime mai mic decât în cazul expunerii la lumina naturală a soarelui), trebuie să fim siguri că celula solară are curentul de scurt-circuit de valoare reală. Aplicarea unei luminii suplimentare de polarizare albă până la 1000 W/m^2 poate rezolva această problemă, dar necesită în plus controlul temperaturii celulei care trebuie calibrată. Iradierea monocromatică absolută poate fi determinată fie atunci când atât nivelul sursei de lumină cât și absorbția din monocromator sau filtre sunt cunoscute, sau prin folosirea pentru celula testată a unui detector de referință, calibrat pentru lungimile de undă selectate. Această metodă este descrisă ca "Metoda răspunsului spectral diferențial" în ISO/DIS 15387.

6. Aspecte de trasabilitate

În conformitate cu acordurile internaționale, toate calibrările trebuie să se refere la unitățile SI. În particular, laboratoarele de calibrare acreditate conform ISO 17025 trebuie să mențină un lanț neîntrerupt de trasabilitate. IEC 904-1 se referă la Referința Radiometrică Mondială ca standard principal, deoarece scara radiometrică SI este demonstrată doar pentru nivelurile de iradiere mult sub lumina naturală a soarelui.

Un standard internațional se află în pregătire, IEC 904-4 PWI, care va defini procedurile pentru stabilirea trasabilității calibrării referinței pentru dispozitivele fotovoltaice. Acesta va defini cerințele pentru procedurile de calibrare utilizate pentru întreținerea lanțului de trasabilitate, cum ar fi incertitudinea, și enumeră câteva dintre metodele utilizate.

7. Limitele incertitudinii

Toate procedurile de calibrare trebuie să stabilească și să confirme în mod regulat limitele de incertitudine fie prin intermediul măsurătorilor de verificare sau prin procedura "Round-Robin". Referințele [12], [13] și [14] sunt exemple de astfel de estimări de incertitudine. Din intercomparațiile care au avut loc în ultimii ani, incertitudini între $\pm 1,0\%$ și $\pm 2,0\%$ sunt realiste și realizabile la nivel mondial. O concentrare curentă a metodei Round-Robin este stabilirea unei "Scări Globale Fotovoltaice" (WPVS – acronim în limba engleză), care ar consta într-un set de celule de referință standardizate, care să servească laboratoarelor de calibrare ca referință primară de laborator [15].

8. Contribuții la incertitudine

În cele ce urmează se prezintă cele mai importante contribuții la incertitudinea cu privire la procesul de măsurare și evaluare. Procesul de măsurare în sine constă în determinarea iradierii și temperaturii, precum și în determinarea curbei I-V a modulului fotovoltaic.

Procesul de evaluare constă din doi pași principali, ambii fiind pasibili de incertitudini. În primul rând, curba I-V măsurată este corectată la STC, utilizând radiația efectivă determinată și temperatura măsurată. În al doilea rând, parametrii modulului electric provin (sunt extrași) de la (din) curba I-V corectată.

9. Estimarea incertitudinii

În continuare se prezintă un exemplu de evaluare a incertitudinii efectuat în conformitate cu regulile menționate în GUM [16, 17].

În rezumat, pașii necesari pentru evaluarea și exprimarea incertitudinii unui rezultat de măsurare, așa cum este prezentat în capitolul 8 al GUM, sunt: (1) Este necesară formularea unei *ecuații de măsurare* care să exprime relația dintre valorile mărimii măsurate și cele ale variabilelor de intrare. (2) Valorile estimate ale variabilelor de intrare trebuie determinate împreună cu (3) *incertitudinea lor standard* și (4) posibilele lor corelații. (5) Rezultatul măsurării se calculează utilizând ecuația de măsurare. (6) Incertitudinea standard combinată trebuie determinată din incertitudinile standard și din corelațiile dintre intrările la ecuația de măsurare. (7) Trebuie să se prezinte incertitudinea extinsă și (8) rezultatul măsurătorilor trebuie prezentat împreună cu standardul combinat sau incertitudinea extinsă.

Scopul urmărit este de a stabili un calcul de incertitudine bazat pe o procedură standardizată, pentru a permite o adaptare ușoară la alte sisteme de măsurare. În plus, procedura ar trebui să permită utilizarea directă a incertitudinilor relative, deoarece se intenționează să fie valabilă pentru majoritatea modulelor fotovoltaice existente.

Evaluările de incertitudine pentru procedurile de montare și corecție, care complică utilizarea strictă a GUM, ar trebui să fie ușor de inclus. În consecință, sunt necesare unele simplificări în comparație cu aplicarea strictă a GUM, care sunt descrise în cele ce urmează.

Ecuatiile de măsurare analitică (complete) nu sunt utilizate în acest caz, deoarece relația dintre toate variabilele de intrare și rezultatul măsurătorilor nu poate fi exprimată într-o ecuație analitică cu cunoștințele actuale. În schimb, se folosește simplificarea sugerată la punctele 5.1.4 și 5.1.5 din GUM. Ecuația de măsurare (Ecuația 2) exprimă empiric modul în care o anumită modificare a unei mărimi de intrare se propagă la mărirea de ieșire.

$$Y = Y_0 + c_1\delta_1 + c_2\delta_2 + \dots + c_n\delta_n \quad (2)$$

unde: Y este mărirea măsurată, X_i reprezintă variabilele de intrare, $Y_0 = f(X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{n,0})$, $X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{n,0}$, reprezintă valorile nominale, $\delta_i = X_i - X_{i,0}$ reprezintă transformări ale variabilelor de intrare iar c_i reprezintă coeficienții de sensibilitate.

Detalii privind estimarea valorilor relevante pentru variabilele de intrare și deviația lor standard sunt prezentate în secțiunea 10. Toate incertitudinile prezentate în tabele se referă la incertitudini standard, cu excepția cazului în care se specifică altfel în mod explicit. Ocazional, jumătatea lățimii unei distribuții de probabilitate dreptunghiulare va fi dată în text, care este indicat cu " $\pm$ " precedând numărul. Incertitudinea standard a unei distribuții de probabilitate dreptunghiulare cu jumătate de lățime a este $a/\sqrt{3}$.

Deoarece ecuația 2 reprezintă o construcție teoretică, rezultatul măsurătorii nu este calculat utilizând ecuația de măsurare, dar determinat prin etapele descrise în secțiunea 3. Incertitudinea combinată se calculează în conformitate cu legea propagării incertitudinii (ecuația 10 din GUM) după cum urmează:

$$u_c^2(y) = (c_1u_{x1})^2 + (c_2u_{x2})^2 + \dots + (c_nu_{xn})^2 \quad (3)$$

Incertitudinile combinate pot fi calculate în mod repetat utilizând Ecuația 3 și pot, prin urmare, să reprezinte suport pentru incertitudinea combinată pentru iradierea măsurată, iradierea efectivă și, în cele din urmă, pentru I_{SC} , P_{max} etc. Acest lucru permite un calcul relativ simplu și standardizat al incertitudinii. Trebuie să fim conștienți de faptul că, procedând la fel, toate variabilele de intrare sunt tratate ca necorelate. Această aproximare este posibilă deoarece se presupune că corelațiile dintre variabilele de intrare sunt neglijabile. Acest lucru va fi abordat cu mai multe detalii în continuare în ceea ce privește P_{max} și FF.

Coeficienții de sensibilitate c_i sunt determinați empiric. Foarte des, c_i sunt egale cu unitatea, ceea ce înseamnă că incertitudinea determinată a variabilei de intrare X_i se propagă în totalitate la Y. Acest lucru este valabil mai ales atunci când incertitudinea lui X_i este estimată direct în mărirea Y, de exemplu, în cazul tuturor contribuțiilor la incertitudinea de iradiere, temperatură și curba I-V (vezi tabelele 1, 2, 3). Cu toate acestea, în ceea ce privește propagarea incertitudinii iradierii la tensiune și curent, trebuie aplicați diferiți coeficienți de sensibilitate, deoarece curentul este direct proporțional cu iradierea, în timp ce tensiunea nu este. Detalii sunt prezentate în secțiunea 10.

Incertitudinea extinsă a tuturor parametrilor modulului electric se calculează cu un factor de acoperire $k = 2$, pentru a obține un interval de acoperire de 95%. Se consideră că distribuția probabilității rezultatului măsurării este normală, deoarece sunt implicate un număr semnificativ de variabile de intrare cu distribuții normale și rectangulare (a se vedea G.6.6 din GUM) [16].

Activitatea III.2 Analiza, optimizarea și testarea sistemului de caracterizare și evaluare

În cadrul acestei activități, am analizat, testat și optimizat sistemul de caracterizare a celulelor și modulelor PV Optosolar (fig. 2.1), astfel:

1. Verificarea funcționalității componentelor simulatorului solar;
2. Identificarea modului de conectare al mufelor și cablurilor existente în vederea interconectării echipamentelor existente.

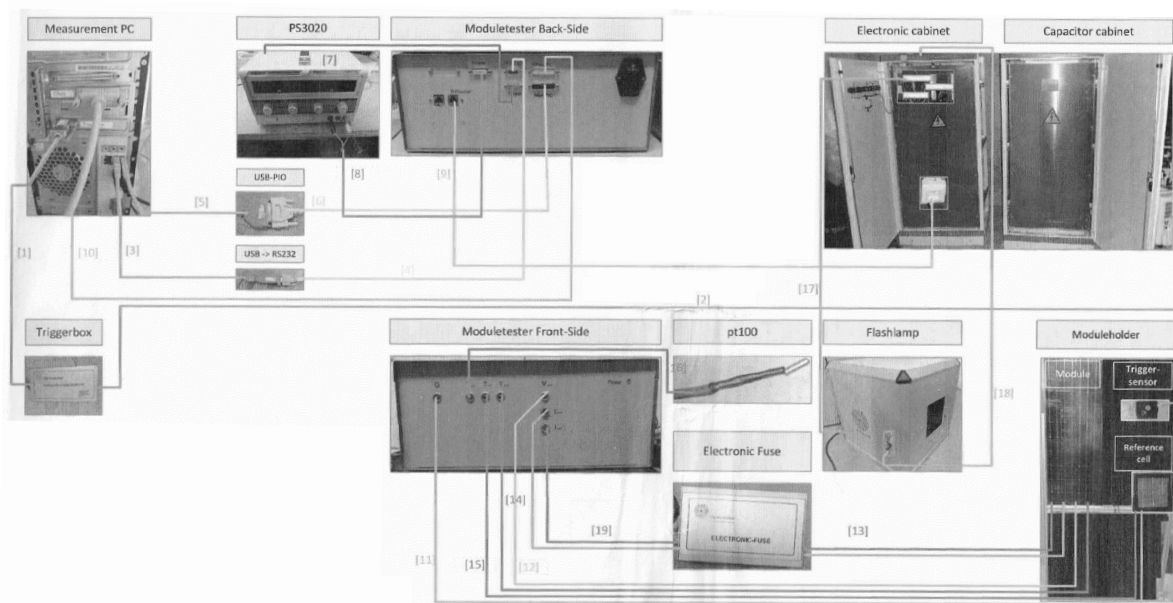


Fig. 2.1. Schema bloc cu modulele și conexiunile sistemului de caracterizare in-dor a celulelor și modulelor PV Optosolar

3. Interconectare hardware a modulelor:

- "Electronic cabinet" cu "Capacitor Cabinet" (87651.1 cu 87651.2)
- "Electronic cabinet" cu "Flashlamp" (87651.1 cu 87651.6) – 2 cabluri (17 și 18)
- "Moduletester Front-Side" cu "Senzor temperature pt100" (87651.8 cu pt100)
- "Moduletester Front-Side" cu "Module holder" (87651.8 cu 87651.) – 2 cabluri (12 și 14 – V și T)
- "Moduletester Front-Side" cu "Electronic Fuse" (87651.8 cu 87651.9) – 2 cabluri (19 – I)
- "Moduletester Front-Side" cu "Referece Cell" (87651.8 cu RefCell) – 2 cabluri (11 și 15 – G și T)
- "Electronic Fuse" cu "Module holder" (87651.9 cu 87651.11) – 2 cabluri (13)
- "Moduletester Back-Side" cu "PS3020" (87651.8 cu 87651.7) – 2 cabluri (7 și 8)
- "PC" cu "Triggerbox" (87651.4 cu 87651.10) – 1 cablu (1)
- "TriggerSensor" cu "Triggerbox" (87651. cu 87651.10) – 1 cablu (2)
- "Moduletester Back-Side" cu "Electronic cabinet" (87651.8 cu 87651.1) – 1 cablu (9)
- "Moduletester Back-Side" cu "PC" (87651.8 cu 87651.4) – legatura directă (10)
- "Moduletester Back-Side" cu "PC" (87651.8 cu 87651.4) – legatura prin convertorul USB -> RS232 (3)
- "Moduletester Back-Side" cu "PC" (87651.8 cu 87651.4) – legatura prin convertorul USB -> PIO (5 și 6)

4. Pornirea sistemului de testare a panourilor PV (Optosolar module).

Simulatorul solar pentru module fotovoltaice este dedicat caracterizării performanțelor modulelor solare. Sistemul este capabil să înregistreze parametrii modulelor fotovoltaice, astfel: eficiența de conversie, caracteristica I-V, curentul de scurt-circuit I_{sc} , tensiunea în gol V_{oc} , puterea maximă P_{max} , curentul maxim I_{pmax} , tensiunea maximă V_{pmax} .

Echipamentul efectuează testările în condiții standard STC (Standard Test Conditions) conform standardului IEC 61215.

Rezultatele măsurătorilor sunt afișate grafic pe fereastra principală. Cifrele statistice cheie sunt calculate pe baza măsurării semnalelor de curent și de tensiune iar corecțiile de temperatură și de iradiere sunt efectuate automat.

În cazul realizării unui set de măsurători, seria de rezultate poate fi grupată și stocată într-un fișier în vederea unei utilizări ulterioare. Rezultatele măsurătorilor pot fi, de asemenea, transferate într-o bază de date externă Excel iar Software-ul poate fi astfel accesat de la distanță folosind o interfață TCP.

Coeficienții de corecție sunt descriși în standardul IEC891: coeficientul de temperatură al curentului (α): o valoare numerică exprimată în $\mu A/cm^2/^{\circ}C$; coeficientul de temperatură al tensiunii (β): o valoare numerică exprimată în $mV/cm^2/^{\circ}C$; factorul de corecție a curbei (K): o valoare numerică exprimată în $m\Omega/celula/^{\circ}C$, rezistența serie (R_s): o valoare numerică exprimată în $m\Omega/celulă$.

Rezultatele estimării incertitudinii pentru modulele fotovoltaice de tip c-Si (crystalline silicon)

În această secțiune se explică principalele surse de incertitudine și se prezintă estimările cantitative. Rezultatele sunt valabile pentru modulele standard c-Si (adică fără probleme de stabilitate), măsurarea cu corecții de nepotrivire spectrală la STC și dimensiuni de module de până la $2,2 \times 1,1 m^2$.

1. Iradierea efectivă

"Iradierea efectivă" diferă de iradierea măsurată de către celula de referință în ceea ce privește distanța și orientarea spre sursa de lumină, factorul MM și neuniformitatea spațială.

Incertitudinea măsurată a iradierii este compusă din următoarele patru contribuții (a se vedea și tabelul 1): (1) Incertitudinea introdusă de lanțul de achiziție completă a semnalului celulelor de referință este de 0,059% (inclusiv rezistorul de șunt). (2) Incertitudinea datorată corecției temperaturii este estimată la 0,011%, pe baza condiției ca temperatura în laborator și deci a celei de referință să fie de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. (3) Incertitudinea extinsă a valorii de calibrare furnizată de PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Institutul Național de Metrologie al Germaniei) este de 0,6% ($k = 2$). În prezent, aceasta este cea mai mică incertitudine la nivel mondial pentru calibrarea celulelor de referință. Deviația maximă este considerată a fi $\pm 0,2\%$. Non-linearitatea poate fi neglijată pentru măsurătorile STC, deoarece raportul de calibrare PTB indică o liniaritate excelentă de aproape 1000 W/m^2 (abatere mai mică de 0,001%).

Tabel 1. Contribuții la incertitudinea iradierii efective. Rezultatele estimării incertitudinii pentru iradiere, valabile pentru valori de $1000 \pm 10 \text{ W/m}^2$. Neuniformitatea spațială de bază este de 0,84%. Incertitudinea combinată se calculează conform ecuației 3 cu c_i egal cu unitatea.

Sursă	Incertitudinea relativă standard (%)	Distribuția probabilităților
Semnal (DAQ)	0,059	normală
Corecția de temperatură	0,011	normală
Distanță/orientare	0,084	rectangulară
Nepotrivire spectrală	0,420	normală
Neuniformitate spațială	0,173	rectangulară
Incertitudine standard relativă combinată	0,566	normală

În ceea ce privește distanța și orientarea spre sursa de lumină, numai cadrul modulului poate provoca incertitudine, deoarece celula de referință și modulul sunt montate pe o structură rigidă și bine aliniată. Eroarea maximă a distanței este estimată la $\pm 5 \text{ mm}$, eroarea maximă de neparalelism fiind de $\pm 2,5 \text{ mm}$. Aceasta are ca rezultat o incertitudine de 0,084%, presupunând o sursă punctuală de lumină (care este o aproximație).

Pentru a estima incertitudinea MM trebuie să se includă incertitudinile celei de referință precum și distribuția spectrală relativă a sursei de lumină. (1) Incertitudinea celei de referință privind rspunsul spectral (SR) este furnizată de raportul de calibrare PTB și este mai mică de 0,5% între 300-1000 nm. (2) Incertitudinea combinată a modulului SR include două contribuții: În primul rând, incertitudinea de măsurare în sine este asigurată de celulele folosite. De reținut că incertitudinea pentru măsurarea celulelor din cadrul unui modul este mai mare decât pentru celule individuale, deoarece controlul temperaturii este mai dificil. În al doilea rând, incertitudinea datorată diferenței SR a celei măsurate (a modulului de referință SR) și a întregului modul testat este estimată din deviația standard observată din măsurătorile a 20 de celule c-Si tipice. (3) Incertitudinea combinată a distribuției spectrale este calculată din trei contribuții: estimarea incertitudinii de măsurare a analizei spectroradiometrului prezentată în [3], deviația standard medie a 5 măsurători (măsurarea săptămânală este media a 5 măsurători) și abaterea standard a modificării datorată îmbătrânirii lămpii de la o săptămână la alta.

Deoarece distribuția spectrală a simulatorului și, prin urmare, MM este dependentă de modificările mai mari ale tensiunii lămpii, este important de observat că toate măsurătorile considerate ale distribuției spectrale au fost efectuate foarte aproape de nivelul de 1000 W/m^2 (adică cu lămpi egale cu cele înregistrate în timpul unei măsurări STC normale). Incertitudinea rezultată a MM este de 0,420% pentru un modul tipic c-Si măsurat cu o celulă de referință din laborator.

Neuniformitatea spațială este de 0,84%, determinată cu dispozitivul de neuniformitate menționat mai sus și calculată conform ecuației 4.

$$\text{neuniformitate} = (G_{\max} - G_{\min}) / (G_{\max} + G_{\min}) * 100\% \quad (4)$$

Aceasta contribuie la incertitudinea măsurării în două moduri: în primul rând, existența petelor întunecate și strălucitoare duce la diferenți fotocurenți în diferitele celule și afectează forma curbei I-V [18]. Această contribuție este considerată separat mai jos în secțiunea "Curba I-V". În al doilea rând, și mai important, poate apărea o eroare de „polarizare” (efect fotovoltaic) dacă celula de referință se află pe un loc special luminos în planul de măsurare. Pentru a minimiza această eroare, celula este plasată într-un loc cu iradierea egală cu media iradierii din planul modulului [9]. Este important de menționat că incertitudinea rămâne, deoarece selecția acestui loc nu este încă exactă. Aceasta se datorează incertitudinii de măsurare inerente determinării neuniformității și diferenței de dimensiune dintre celula de referință și celulele dispozitivului. Incertitudinea rămasă este estimată cu privire la neuniformitatea din împrejurimile imediate ale locului selectat, măsurarea fiind efectuată cu un dispozitiv de aceeași dimensiune cu celula de referință. Neuniformitatea determinată este de 0,3%, considerată o incertitudine cu o distribuție a probabilității dreptunghiulare.

Incertitudinea combinată a radiației efective are ca rezultat 0,566% pentru nivelurile de iradiere apropiate de 1000 W/m^2 .

De reținut este faptul că influența cauzată de neuniformitatea temporală este neglijabilă, deoarece stabilitatea pe termen lung definită în IEC 60904-9 este mai bună de 0,3%, iar corecția la 1000 W/m^2 se realizează punct-cu-punct. Ca o consecință a funcționării foarte stabile a lămpii într-un impuls, distribuția spectrală nu se schimbă considerabil în timpul în care impulsul se află pe platoul său stabil [19].

2. Temperatura modulului

Incertitudinea introdusă de măsurarea temperaturii modulului este dată de: calibrarea senzorului, diferența de temperatură necunoscută dintre spatele modulului și joncțiunea p-n și neuniformitatea temperaturii (tabelul 2). Ca cerință pentru măsurare, temperatura fiecăruia dintre cei patru senzori trebuie să fie în limitele a $25 \pm 1^\circ\text{C}$, ceea ce are drept rezultat o maximă neuniformitate a temperaturii de 4%.

Informațiile privind incertitudinea introdusă de senzorul de temperatură sunt obținute din raportul de etalonare (toleranță de decalare, maxim: $\pm 0,1$ K). Incertitudinea DAQ, inclusiv măsurarea și rezoluția, este de 0,327%. Deoarece *modulul este stocat într-un mediu cu temperatură controlată cu câteva ore înainte de măsurare*, presupunem că diferența dintre joncțiunea p-n și spatele ei este mai mică de $\pm 0,1$ K, ceea ce are ca rezultat o incertitudine de 0,231%. Efectele neuniformității spațiale a temperaturii sunt, în general, similare cu cele descrise pentru iradiere: există o incertitudine de offset și un efect asupra curbei I-V care va fi discutat mai jos. Diferența maximă dintre temperatura medie reală și media celor patru senzori este estimată a fi mai mică de $\pm 0,1$ K ca urmare a stocării modulului. Incertitudinea în temperatura modulului are ca rezultat 0,517% pentru temperaturi apropiate de 25°C.

Tabel 2. Contribuții la incertitudinea temperaturii. Rezultatele estimării incertitudinii pentru temperatură, valabile pentru valorile cantitative de 25 ± 1 °C. Neuniformitatea spațială estimată la baza este de 4%. Incertitudinea combinată se calculează conform ecuației 3 cu c_i egal cu unitatea.

<i>Sursă</i>	<i>Incertitudinea relativă standard (%)</i>	<i>Distribuția probabilităților</i>
<i>Senzor de temperatură (calibrare Pt100)</i>	<i>0,231</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Semnal (DAQ)</i>	<i>0,327</i>	<i>normală</i>
<i>Joncțiunea p-n/spate</i>	<i>0,231</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Neuniformitatea temperaturii</i>	<i>0,231</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Incertitudine standard relativă combinată</i>	<i>0,517</i>	<i>normală</i>

3. Curba I-V

Incertitudinea măsurării curbei I-V este compusă din contribuțiile DAQ pentru fiecare punct și o contribuție dependentă de tensiune care afectează forma curbei I-V (tabelul 3). Toate incertitudinile standard sunt estimate cu privire la un parametru specific modulului electric. Dacă nu se specifică altfel, incertitudinea pentru $P_{\max}$ și FF este suma rădăcinilor pătratelor $I_{P_{\max}}$ și $V_{P_{\max}}$, respectiv I_{SC} , V_{OC} și respectiv $P_{\max}$.

Contribuțiile la incertitudinea DAQ se ridică la 0,058% atât pentru curent, cât și pentru tensiune.

În ceea ce privește incertitudinea dependenței de tensiune, se ia în considerare rezistența ohmică, efectele de capacitate legate de rata de variație a tensiunii care provoacă histerezis, propagarea efectelor de iradiere și de temperatură neuniformă și de stabilitate. (1) Rezistența ohmică înainte de măsurarea în patru puncte introduce dependența curentului de tensiune. Acest lucru nu afectează nici V_{OC} , nici măsurarea curentului în sine, adică curenții I_{SC} și I_{MPP} . Rezistența maximă este estimată la 2 mOhm (cablu de aproximativ 10 cm de la conectorii modulului la punctul de măsurare cu patru fire). În punctul de putere maximă ($P_{\max}$), 2 mOhm provoacă o schimbare de tensiune de 16 mV, presupunând un curent maxim de 10 A. Acest lucru are ca rezultat o incertitudine relativă de 0,058% pentru $V_{P_{\max}}$ și $P_{\max}$. (2) Incertitudinea datorată efectelor capacității legate de viteza de variație a tensiunii este minimizată prin măsurătorile secțiunii și histerezisului. Histerezisul maxim acceptat în $P_{\max}$ (Ecuația 1) este de 0,5%. Aceasta asigură că adevărata putere nu diferă niciodată mai mult de $\pm 0,5\%$ față de P_{MPP} determinată din media curbei I-V. Această eroare maximă este luată în considerare în estimarea incertitudinii. Deoarece abaterea curbei față de curba adevărată nu este neapărat simetrică [18], distribuția probabilității este considerată dreptunghiulară. Aceasta are ca rezultat o incertitudine standard datorită histerezisului de 0,289% din P_{MPP} . În afară de $P_{\max}$, s-a constatat prin comparații ale mai multor curbe I-V că o influență asupra I_{SC} și V_{OC} nu poate fi exclusă. Trebuie precizat că, în această etapă a analizei, nu este posibilă separarea clară a incertitudinilor legate de DAQ și de manipularea datelor (aleatorii), de incertitudinile de histerezis reale (sistematice). Prin urmare, incertitudinea atribuită histerezisului poate fi supraestimată.

După cum s-a menționat mai sus, neuniformitatea iradierii și a temperaturii are o influență suplimentară asupra caracteristicii I-V. În cazul iradierii (3), s-a estimat influența pe baza unei simulări. Pentru un modul proiectat tipic (6x10 celule, 3 diode bypass) și diferite profiluri de neuniformitate, a fost calculată abaterea parametrilor modulului electric rezultat în comparație cu uniformitatea perfectă. Modelul de simulare subadiacent a fost prezentat în [20]. Pentru un profil tipic de neuniformitate de 2%, simularea a calculat o deviație în FF de aproximativ + 0,2%. Pe baza neuniformității de 0,84%, s-a estimat incertitudinea standard pentru toți parametrii modulului electric, așa cum este prezentat în tabelul 3. Efectul neuniformității de temperatură (4) se estimează prin înmulțirea neuniformității maxime de 1 K cu coeficienții de temperatură. Ca coeficienți de temperatură s-au utilizat cele mai bune estimări specifice tehnologiei dintr-un set mare de date obținut pe parcursul ultimilor ani: -0,33%/K pentru V_{OC} și ca aproximație pentru $V_{P_{\max}}$, 0,04%/K pentru valorile curente, respectiv. Posibile corelații sunt neglijate, deoarece impactul lor este limitat datorită limitelor stricte de temperatură. (5) Efectele de stabilitate nu trebuie luate în considerare pentru tehnologiile c-Si standard.

Tabel 3. Contribuții la incertitudinea parametrilor curbei I-V pentru module c-Si. Rezultatele estimării incertitudinii pentru parametrii curbei I-V măsurate, valabile pentru valorile modulelor tipice disponibile în comerț. Incertitudinile combinate au fost calculate conform ecuației 3 cu c_i egal cu unitatea pentru fiecare coloană. În coloanele pentru $P_{\max}$ și FF, incertitudinea standard în fiecare linie este suma rădăcinilor pătratelor $I_{P_{\max}}$, $V_{P_{\max}}$; sau I_{SC} , $I_{P_{\max}}$, V_{OC} , $V_{P_{\max}}$, respectiv; cu excepția histerezisului ($P_{\max}$) și a neuniformității prin iradiere ($P_{\max}$ și FF), unde incertitudinea standard a fost estimată direct.

<i>Incertitudinea relativă standard (%)</i>	<i>I_{SC}</i>	<i>$I_{P_{\max}}$</i>	<i>V_{OC}</i>	<i>$V_{P_{\max}}$</i>	<i>$P_{\max}$</i>	<i>FF</i>	<i>Distribuția probabilităților</i>
<i>Semnal (DAQ)</i>	<i>0,058</i>	<i>0,058</i>	<i>0,058</i>	<i>0,058</i>	<i>0,082</i>	<i>0,117</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Rezistența ohmică</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,058</i>	<i>0,058</i>	<i>0,058</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Histerezis</i>	<i>0,115</i>	<i>0,128</i>	<i>0,192</i>	<i>0,377</i>	<i>0,289</i>	<i>0,366</i>	<i>normală, excepție P_{MPP}</i>
<i>Neuniformitatea iradierii</i>	<i>0,058</i>	<i>0,058</i>	<i>0,035</i>	<i>0,035</i>	<i>0,067</i>	<i>0,095</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Neuniformitatea temperaturii</i>	<i>0,023</i>	<i>0,023</i>	<i>0,191</i>	<i>0,191</i>	<i>0,192</i>	<i>0,271</i>	<i>rectangulară</i>
<i>Incertitudine standard relativă combinată (%)</i>	<i>0,144</i>	<i>0,154</i>	<i>0,279</i>	<i>0,431</i>	<i>0,367</i>	<i>0,483</i>	<i>normală</i>

4. Corectarea STC și determinarea parametrilor

Chiar dacă limitele de deviere de la STC sunt foarte stricte ($1000 \pm 2 \text{ W/m}^2$, $25 \pm 1^\circ\text{C}$ pentru media tuturor punctelor de măsurare), există o contribuție la incertitudine datorată corecției la STC. Trebuie să se considere că parametrii de corecție nu sunt cunoscuți exact. Incertitudinea coeficientului de temperatură este estimată la $\pm 0,1\%/K$ pentru tensiune și $\pm 0,02\%/K$ pentru curent (vezi și [21]). Contribuția la incertitudine datorată corecției pentru toți parametrii modului electric a fost estimată prin modificarea parametrilor și metodelor de corecție și este prezentată în tabelul 4. Incertitudinea $I_{P_{\max}}$, $V_{P_{\max}}$ și $P_{\max}$ are o magnitudine mai mare comparativ cu I_{SC} și V_{OC} .

Tabel 4. Rezultatele estimării incertitudinii. Rezultatele estimării incertitudinii pentru toți parametrii electrici ai curbei I-V, valori valabile pentru valorile modulelor disponibile în mod obișnuit și dimensiunea modului mai mică de $2,2 \times 1,1 \text{ m}^2$. Incertitudinile combinate au fost calculate conform ecuației 3 pentru fiecare coloană. În coloanele pentru $P_{\max}$ și FF, incertitudinea standard în fiecare linie este suma rădăcinilor de pătrate ale $I_{P_{\max}}$, $V_{P_{\max}}$ sau I_{SC} , $I_{P_{\max}}$, V_{OC} , $V_{P_{\max}}$ respectiv. Coeficienții de sensibilitate c_i sunt unitați, cu excepția iradierii și a temperaturii.

Contribuția la Incertitudine ca u_{xi} în %	I_{SC}	$I_{P_{\max}}$	V_{OC}	$V_{P_{\max}}$	$P_{\max}$	FF
<i>Iradierea efectivă</i>	0,566	0,566	0,034	0,034	0,567	0,068
<i>Temperatura</i>	0,005	0,005	0,043	0,043	0,043	0,061
<i>Curba I-V</i>	0,144	0,154	0,279	0,431	0,367	0,483
<i>Corecția la STC</i>	0,026	0,026	0,118	0,316	0,226	0,256
<i>Factorul de reproductibilitate</i>	0,287	0,350	0,056	0,244	0,364	0,174
<i>Incertitudine combinată standard în %</i>	0,651	0,825	0,315	0,613	0,802	0,584
<i>Incertitudinea extinsă ($k=2$)</i>	1,3	1,7	0,6	1,2	1,6	1,2

5. Factorul de reproductibilitate

Referitor la procesul de estimare a incertitudinii, trebuie să se concluzioneze că o estimare a incertitudinii în mod constant optimist fără un motiv bun ar putea fi o supraestimare a cunoștințelor. Analiza de incertitudine prezentată este cuprinzătoare în măsura în care acoperă toate contribuțiile importante. Cu toate acestea, aceasta conține în continuare corelații neglijate și unele contribuții mici, care până în prezent nu sunt cuantificate în mod satisfăcător sau care nu pot fi detectate imediat de sistemul de asigurare a calității. În plus, până în prezent, nu s-a luat în considerare posibila influență din partea operatorului care efectuează măsurarea, chiar dacă această influență este mică, măsurătorile fiind efectuate în conformitate cu procedeele recunoscute. Pentru a ține cont de aceasta, se include un "factor de reproductibilitate" suplimentar față de măsurătorile de asigurare a calității la fiecare 3 săptămâni. Aceasta nu este o implicare de ordinul întâi de la aplicarea GUM, ci este o soluție practică pentru a exprima "gradul de credință".

Factorul de reproductibilitate se obține din măsurătorile unui set de nouă module (c-Si, mărimi diferite și producători).

Tabelul 4 rezumă rezultatele pentru toți parametrii. Deviația standard unică este considerată ca estimare a incertitudinii ca factor de reproductibilitate.

6. Calculul incertitudinii combinate și extinse

Tabelul 4 prezintă un sumar al tuturor contribuțiilor discutate la incertitudinile parametrilor modului electric. Incertitudinile combinate rezultate au fost calculate conform ecuației 3. Se presupune că corelațiile posibile sunt neglijabile. O explicație pentru această ipoteză este dată în cele ce urmează pentru corelațiile cele mai evidente posibile datorate temperaturii și iradierii. De reținut că raționamentul este destinat valorii de iradiere aproape de 1000 W/m^2 , și doar modificări de temperatură mici. În cazul $P_{\max}$, atât $I_{P_{\max}}$ cât și $V_{P_{\max}}$ depind de iradiere. Deoarece $I_{P_{\max}}$ este direct proporțional cu iradierea și tensiunea este logaritmic dependentă de iradiere, neglijabil pentru mici schimbări de iradiere, neglijarea corelației este justificabilă. În mod similar, dependența $I_{P_{\max}}$ de temperatură este foarte mică și deci neglijabilă. În cazul FF, raportul $I_{P_{\max}}/I_{SC}$ este independent de iradiere și poate fi de asemenea considerat independent de temperatură datorită coeficienților de temperatură mici. Raportul $V_{P_{\max}}/V_{OC}$ pot fi considerat independent de iradiere, iar variația ușoară cu temperatura a lui $V_{P_{\max}}$ și V_{OC} (datorită coeficienților de temperatură relativ diferiți) poate fi neglijată pentru modificări mici ale temperaturii.

Coeficienții de sensibilitate folosiți sunt unitatea, cu excepția incertitudinilor privind iradierea și temperatura efectivă. În ceea ce privește iradierea, c_i au fost determinați din dependența de iradiere obținută prin măsurători la 1000 W/m^2 și 900 W/m^2 pentru o varietate de module. Coeficientul c este unitatea pentru I_{SC} și $I_{P_{\max}}$, curentul fiind direct proporțional cu iradierea. Coeficientul c este 0,06 pentru V_{OC} și aproximativ pentru $V_{P_{\max}}$ și 0,12 pentru FF. Contribuția la incertitudine prezentată în tabelul 4 este $c_{I_{xi}}$, adică $0,566\% \cdot c$ pentru iradiere. Pentru temperatură, c_i este egal cu coeficienții de temperatură ($-0,33\%/K$ și $0,04\%/K$) ori temperatura de referință de 25°C .

Activitatea III.3. Validarea sistemului de caracterizare și evaluare

Proprietățile fizice ale modului se exprimă prin: lungimea modului, exprimată în cm; lățimea modului exprimată în cm; aria celulei, exprimată în cm^2 ; numărul de celule solare conectate în paralel; numărul de celule solare conectate în serie.

În cadrul măsurătorilor s-a folosit panoul solar monocristalin, tip **BAUER BS 6MB12 260** cu următoarele caracteristici din fișa tehnică (datasheet):

- Puterea nominală: 260 W
- Tensiunea la $P_{\max}$: 31,00 V
- Curentul la $P_{\max}$: 8,40 A

- Curentul de scurtcircuit: 8,91 A
- Tensiunea în gol: 37,62 V
- Randamentul: 16,01 %
- Tensiunea maximă a sistemului: 1000 V
- Numărul de celule: 60 legate în serie
- Dimensiuni: 164 cm x 100 cm
- Greutate: 18 kg
- Coeficientul de temperatură al curentului de scurtcircuit: $\alpha = + 0,05 \text{ }^\circ\text{C} \equiv 4630 \text{ } \mu\text{A}/^\circ\text{C}$ pentru întregul panou; valoarea coeficientului de corecție folosită la măsurătoare: $\alpha = 4360/\text{suprafața utilă a panoului} = 4360/14145 \text{ cm}^2 = 0,32 \text{ } \mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$.
- Coeficientul de temperatură al tensiunii în gol: $\beta = - 0,35 \text{ }^\circ\text{C} = - 131 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ pentru întregul panou; valoarea coeficientului de corecție folosită la măsurătoare: $\beta = - 131/\text{nr. celule în serie} = - 131/60 = - 2,18 \text{ mV}/\text{cell}/^\circ\text{C}$.

Datele obținute în urma măsurătorii folosind simulatorul sunt (în condițiile 1000 W/m², 25°C):

- Puterea maximă: 260,58 W
- Tensiunea la P_{max} : 29,71 V
- Curentul la P_{max} : 8,77 A
- Curentul de scurtcircuit: 9,16 A
- Tensiunea în gol: 37,07 V
- Factorul de umplere: 0,76
- Randamentul: 15,89 %.

Erorile relative ale valorilor măsurate față de datele de catalog sunt: -2,8% pentru I_{sc} , 1,46 % pentru V_{oc} .

Datele obținute pe baza a 5 măsurători ale modulului, efectuate cu Solar I-V 400 de la HT Italia sunt următorii (parametrii electrici, măsurați în condiții STC): $I_{sc} = 8,72 \text{ A}$, $V_{oc} = 37,89 \text{ V}$.

Se calculează: **eroarea medie pătratică și abaterea standard pentru o distribuție normală**, pentru doi parametri, I_{sc} și V_{oc} .

1. Eroarea medie pătratică

Eroarea medie pătratică se calculează în trei cazuri, considerând: (1) **valoarea medie** a valorilor măsurate față de valorile măsurate, (2) **valoarea de catalog** (în condiții STC) față de valorile măsurate și (3) **valoarea de catalog** (în condiții STC) față de valorile măsurate corectate cu valoarea incertitudinii.

Pentru un șir de valori individuale ale mărimii măsurate, x_i , se pune problema de a găsi **valoarea convențional adevărată**, x_o , a mărimii măsurate care să difere neglijabil față de valoarea adevărată, x_o . Dacă $\Delta x_i = x_i - x_o$ reprezintă **eroarea absolută întâmplătoare**, atunci x_o este valoarea pentru care suma $\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)$ este minimă. Derivând în raport cu x_o suma respectivă și egalând cu zero se obține:

$$x_o \equiv x'_o = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \equiv \bar{x}. \quad (5)$$

Deci valoarea convențional adevărată care aproximează cel mai bine valoarea adevărată este media aritmetică a valorilor măsurate.

Eroarea medie pătratică se calculează conform relației:

$$\sigma = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_o)^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

unde: x_i reprezintă valorile individuale ale mărimii măsurate (I_{sc} , V_{oc}).

Pentru calcul se consideră următoarele valori în relația (6): (1) x_i – valorile măsurate, x_o – valoarea medie a valorilor măsurate; (2) x_i – valorile măsurate, x_o – valoarea de catalog în condiții STC; (3) x_i – valorile măsurate corectate cu valoarea incertitudinii, x_o - valoarea de catalog în condiții STC. Incertitudinile combinate standard pentru cei doi parametri, I_{sc} și V_{oc} se consideră cele din tabelul 4 (0,615% pentru I_{sc} și 0,315% pentru V_{oc}). Datele obținute se regăsesc în tabelul 5.

Tabel 1. Rezultatele calculului erorii medii pătratice

I_{sc} (valori măsurate) (A)	I_{sc} mediu (A)	I_{sc} catalog (STC) (A)	Incertitudine combinată standard (%)	σ_1	σ_2	σ_3
8,029	8,270	8,72	0,615	0,025	0,126	0,104
8,506						
7,996						
8,308						
8,509						

V_{oc} (valori măsurate) (V)	V_{oc} mediu (V)	V_{oc} catalog (STC) (V)	Incertitudine combinată standard (%)	σ_1	σ_2	σ_3
36,452	36,078	37,89	0,315	0,023	1,661	1,462
36,166						
36,023						
35,880						
35,880						

Cele trei valori obținute impun câteva comentarii. Dintre valorile (2) și (3), se observă avantajul considerării incertitudinii. Valoarea cea mai mică s-a obținut în cazul (1), dar calculul s-a făcut prin raportare la valoarea medie.

2. Abaterea standard pentru o distribuție normală

Abaterea standard pentru o distribuție normală se calculează în trei cazuri, la fel ca la punctul 11.2.

Abaterea standard pentru o distribuție normală se calculează conform relației:

$$u = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_o)^2}{n(n-1)} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Pentru calcul se consideră următoarele valori în relația (7): (1) x_i – valorile măsurate, x_o – valoarea medie a valorilor măsurate; (2) x_i – valorile măsurate, x_o – valoarea de catalog în condiții STC; (3) x_i – valorile măsurate corectate cu valoarea incertitudinii, x_o – valoarea de catalog în condiții STC. Datele obținute se regăsesc în tabelul 6.

Tabel 2. Rezultatele calculului abaterii standard pentru o distribuție normală

I_{sc} (valori măsurate) (A)	I_{sc} mediu (A)	I_{sc} catalog (STC) (A)	Incertitudine combinată standard (%)	u_1	u_2	u_3
8,029	8,270	8,72	0,615	0,006	0,032	0,026
8,506						
7,996						
8,308						
8,509						

V_{oc} (valori măsurate) (V)	V_{oc} mediu (V)	V_{oc} catalog (STC) (V)	Incertitudine combinată standard (%)	u_1	u_2	u_3
36,452	36,078	37,89	0,315	0,006	0,415	0,365
36,166						
36,023						
35,880						
35,880						

Tabel 3. Tabel rezumativ al măsurătorilor – comparație: măsurare -- catalog

	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	η (%)	FU
Panou BAUER BS 6MB12 260 - măsurare	9,16	37,07	8,77	29,71	15,89	0,76
Panou BAUER BS 6MB12 260 - catalog	8,91	37,62	8,40	31,00	16,01	0,77

Activitatea III.4 Organizarea și derularea stagiilor de pregătire practică ale masteranzilor

În cadrul acestei activități s-a organizat și derulat stagiile de practică ale masteranzilor la ICPE SA. Stagiile de practică s-au desfășurat conform *Acordului de parteneriat între Universitatea Valahia din Târgoviște și ICPE SA București*.

Stagiile de practică s-au desfășurat în perioada *martie 2018 - iunie 2018*, pentru studenții masteranzi:

1. *Iordăchescu Constantin Daniel* - masterand al programului de master: "Sisteme si Echipamente Moderne in Producerea si Utilizarea Energiei", anul II;
2. *Șontea Ștefan Adrian* - masterand al programului de master: "Sisteme si Echipamente Moderne in Producerea si Utilizarea Energiei", anul II;
3. *Ceapă (Dumitrescu) Dănuț* - masterand al programului de master: "Sisteme si Echipamente Moderne in Producerea si Utilizarea Energiei", anul II;
4. *Cărămidă Mihai Ștefan* - masterand al programului de master: "Automatică Avansată, Productică și Informatică Industrială", anul II;
5. *Bidică Petruț Claudiu* - masterand al programului de master: "Automatică Avansată, Productică și Informatică Industrială", anul II.

Legătura între Universitate și partenerul de practică, ICPE SA București, a fost realizată prin intermediul responsabililor de practică (Florin Dragomir și Nicolae Olariu) care au întocmit programele de practică, având și rol de cadru didactic supervisor.

Concluzii

Prezentul raport înglobează rezultatele specifice celor patru activități științifice și tehnice finalizate în cadrul proiectului SICEPV, contract 62BG/2016, în cadrul etapei a III-a. Toate activitățile prezentei etape au urmărit obiectivele propuse în planul de realizare al proiectului.

Metodele de calibrare utilizate astăzi au evoluat, având incertitudini mai bune, care sunt în mod constant apropiate de $\pm 1,5\%$. Metodele diferite, atunci când sunt aplicate cu atenție, au arătat în diferite intercomparații că factorii de calibrare realizați sunt în bună concordanță. Stabilirea Scarei Globale Fotovoltaice, împreună cu un nou standard internațional privind trasabilitatea calibrărilor la unitățile SI se vor baza pe corectitudine și transparență în comercializarea tehnologiei fotovoltaice pe toate piețele mondiale.

Bibliografie

- [1] K. Emery, "Uncertainty Analysis of Certified Photovoltaic Measurements at the National Renewable Energy Laboratory," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO. NREL/TP-520-45299, Aug 2009.
- [2] U. Kräling, *et al.*, "Präzisionsmessungen an PV-Modulen - Anforderungen an die Messtechnik und die Messprozeduren," *Proc. 25th Symposium Photovoltaische Sonnenenergie*, Bad Staffelstein, Germany, 2010.
- [3] J. Hohl-Ebinger, "Untersuchungen zur hochpräzisen Vermessung der elektrischen Parameter von Solarzellen," Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Konstanz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) Freiburg, 2011.
- [4] K. Whitfield and C. R. Osterwald, "Procedure for determining the uncertainty of photovoltaic module outdoor electrical performance," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 9, pp. 87-102, Mar 2001.
- [5] IEC 60904-3 Ed. 2.0, "Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data," International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008.
- [6] IEC 60904-9 Ed. 2.0, "Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements," International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2007.
- [7] C. R. Osterwald, *et al.*, "The world photovoltaic scale: An international reference cell calibration program," in *Proc. 26th IEEE PVSC*, Anaheim, California, USA, 1997, pp. 1209-1212.
- [8] C. R. Osterwald, *et al.*, "The World Photovoltaic Scale: An international reference cell calibration program," *Progress in Photovoltaics*, vol. 7, pp. 287-297, Jul-Aug 1999.
- [9] IEC 60904-1 Ed. 2.0, "Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics," International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2006.
- [10] ISO/IEC Guide 98-1, "Uncertainty of measurement - Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement," International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2009.
- [11] IEC 60891 Ed. 2.0, "Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics," ed: International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2009.
- [12] K. Whitfield and C.R. Osterwald, *Procedure for the determination of Photovoltaic Module Outdoor Electrical Performance*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2001; 9:87-102.
- [13] J.S. Henzing and W.H. Knap, *Uncertainty in pyranometer and pyrliometer measurements at KNMI in De Bilt*, TR-235, ISBN: 90-369-2195-3, 2001.
- [14] W. Zaaiman and A. Realini, *Photovoltaic Device Calibration Intercomparison Test Report*, TNI.98.18, 1998. European Commission, Joint Research Centre.
- [15] *The results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration*, NREL/TP-520-27942, March 2000.
- [16] ISO/IEC Guide 98-3, "Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)," International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008.
- [17] JCGM 100, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement," 2008.
- [18] European Commission Joint Research Centre, "Guidelines for PV Power Measurements in Industry," Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR - Scientific and Technical Research Reports EUR 24359 EN, Apr 2010.
- [19] J. Hohl-Ebinger, *et al.*, "Measuring the spectral distribution of a flash simulator," in *Proc. 22nd EU PVSEC*, Milan, Italy, 2007, pp. 425-428.
- [20] S. Elies, *et al.*, "Influence of row-shading on the performance of PV systems - simulation and measurement," in *Proc. 25th EU PVSEC / 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 2010, pp. 4640-4646.
- [21] D. Dimberger, *et al.*, "Uncertainty of field I-V-curve measurements in large scale PV-systems," in *Proc. 25th EU PVSEC / 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 2010, pp. 4587-4594.
- [22] IEC 60904-2 Ed. 2.0, "Photovoltaic devices - Part 2: Requirements for reference solar devices," International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2007.
- [23] IEC 60904-7 Ed. 3.0, "Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices," International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2008.
- [24] Daniela Dimberger, Ulli Kräling, „Uncertainty in PV Module Measurement -Part I: Calibration of Crystalline and Thin Film Modules” in *IEEE Journal of Photovoltaics*, July 2013.
- [25] H. Ossenbrink, „Calibration procedures – state of the art”, European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit, Ispra, Italy.

Coordonator,
Universitatea VALAHIA din Târgoviște

Rector,
Conf. univ. dr. Călin OROS



Director Proiect,
Conf. dr. ing. Florin DRAGOMIR

Agent Economic
ICPE SA

Director General,
Dr. Dan-Vergil Racicovschi



Responsabil de proiect
Dr. Viorel Ursu