



**Universitatea
Transilvania
din Braşov**

TEZĂ DE ABILITARE

**METODE ŞI SISTEME ELECTRONICE PENTRU
CARACTERIZAREA CELULELOR FOTOVOLTAICE**

**Domeniul: INGINERIE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII
ŞI TEHNOLOGII INFORMAȚIONALE**

**Autor: Conf. Dr. Daniel Tudor COTFAS
Universitatea TRANSILVANIA din Braşov**

BRAŞOV, 2019

CUPRINS

Mulțumiri	2
A. Summary	3
B. Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	6
B1. Realizări științifice și profesionale.....	6
1. Introducere	6
2. Caracterizarea celulelor fotovoltaice.....	9
2.1. Caracterizarea celulelor fotovoltaice în regim static.....	9
2.2. Caracterizarea celulelor fotovoltaice în regim dinamic	12
2.3. Metode de determinare a parametrilor celulelor fotovoltaice.....	16
2.3.1. Metode de determinare a parametrilor de curent continuu.....	17
2.3.2. Metode de determinare a parametrilor de curent alternativ	23
2.4. Sisteme de caracterizare a celulelor fotovoltaice	27
2.4.1. Tehnici de măsurare a caracteristicii I-U	27
2.4.2. Sisteme electronice de caracterizare a celulelor fotovoltaice	30
3. Aplicații	41
3.1. Dispozitive de măsurare a radiației solare	41
3.1.1. Albedometru	41
3.1.2. Sistem de măsurare a radiației solare globale și difuze.....	45
3.2. Metodă rapidă de determinare a timpului de îmbătrânire.....	47
3.3. Lampă solară inteligentă	50
3.4. Utilizarea inteligentă a panourilor fotovoltaice	54
3.5. Sisteme hibride	66
3.6. Model de estimare a radiației solare	86
B2. Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	89
B3. Bibliografie	94

Mulțumiri

Aș dori să mulțumesc în primul rând familiei mele pentru înțelegere și sprijin în realizarea **Tezei de abilitare**, dar în special pentru timpul în care nu am fost alături de soție și fiica mea, decât cu gândul.

Mulțumesc mult colaboratorilor fără de care nu puteam să realizez atâtea lucruri deosebite și în special fratelui meu cu care am împărțit succesele, dar și puținele insuccese din viața de cercetare.

De asemenea, mulțumesc tuturor colegilor din Universitate care m-au sprijinit în activitatea mea didactică și de cercetare.

A. Summary

Renewable energy is a crucial topic with major implications in the economic, social and political life. The jobs number created in the renewable energy domain by the end of 2017 was over 10 million, of which almost 4 million are in solar energy domain and over 3 million in solar photovoltaic (PV). China added for solar PV installed capacity in 2017 more than 50GW, which means more than the total solar PV installed capacity in 2010.

The author's scientific contributions in solar PV domain after obtaining the doctoral degree in 2008, recognized by the scientific community through publications in international journals with high impact factor, books or awards, laid the basis of the habilitation thesis entitled "Methods and electronic systems for photovoltaic cells characterisation".

The habilitation thesis is structured in two main parts:

- in the first part the theory and experimental results about the methods and the systems used to characterised the photovoltaic cells are presented;
- in the second part the main developed applications of the photovoltaic cells are presented.

The dynamic of the solar PV domain is presented in the first chapter. The latest developments in photovoltaic cells research and market are briefly discussed.

The PV cells can be characterized in static and dynamic regimes. The current voltage characteristic is the most important tool used to determine the important parameters of photovoltaic cells. Four original methods to determine de parameters of the photovoltaic cells in static regime are presented in the second chapter of the habilitation thesis. Two of them used analytical methods and the other two used metaheuristic methods: a genetic algorithm and a successive discretization algorithm. The first method is used to determine the series resistance and the shunt resistance of the photovoltaic cells. The other three methods allow the determination of all important photovoltaic cells parameters: the photogenerated current, the reverse saturation current, the ideality factor of the diode and the parasite resistances - the series resistance and the shunt resistance. An original method to determine de parallel capacitance of the photovoltaic cells is also presented in the second chapter.

The techniques used to measure the current voltage characteristic are enumerated and explained. The original system developed to measure and analyse the

photovoltaic cells using the NI ELVIS platform or NI myDAQ is also presented in this chapter. This system can be used in the didactic process as well as in research. It is used in order to determine the important parameters in function of the temperature, irradiance and the angle between the incident light and the photovoltaic cell. The methods from the scientific literature are implemented for each important parameter of the photovoltaic cell. This system was awarded three prizes at the international competition which took place in Austin, USA in 2013 and it also won the gold medal at Euroinvent, Iași, 2015.

Various applications with the photovoltaic cell as major component are briefly described in the third chapter. This chapter is structured in six parts. In the first part the author presents the electronic systems developed to measure the components of the solar radiation: the global horizontal solar radiation, the diffuse solar radiation and the albedo. The last system developed by the author's team was used to measure the albedo for different wheat crops in a collaboration with the National Institute for Agricultural Research and Development Fundulea. The method to determine the ageing lifetime of the solar cell is presented in the second part. For this method the author's team has forwarded a patent application in 2015. Due to a good collaboration with the industrial environment the author successfully participated at developing the prototype of an intelligent solar lamp for Steinel company, which currently produces this intelligent solar lamp. The contribution of the author is presented in the third part of the third chapter. The possibility to increase the power generated by the photovoltaic cells and of course to improve their efficiency, is presented in the fourth and fifth parts. The behaviour of the photovoltaic cells parameters as a function of radiation and temperature is also described in the fourth part. In the fifth part a new hybrid system PV-TEG-STC (photovoltaic cells or panel, thermoelectric generator and solar thermal collector) is presented. The behaviour of the hybrid system under natural sunlight conditions presented by the author's team was amongst the first ones from scientific literature. In this part, the hybrid systems are analysed in laboratory under artificial light, under natural sunlight and concentrated light. The measurements in concentrated light were made using the facilities of the Paul Scherrer Institute from Switzerland and the system developed by the author's team in laboratory. In the last part, the model developed for the estimation of the monthly average daily solar global horizontal and diffuse radiation are presented. These models are developed as local ones.

The author's research activity, presented in the habilitation thesis, also performed by national and international collaborations, comprises of a large number of papers

published in ISI journals with high impact factor, such as: Renewable and sustainable energy reviews, Energy, Energy Conversion and Management, Energies, Measurements, International Journal of Photoenergy, etc. Moreover, the author won four international projects, two national ones and also proposed two patent applications.

B. Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

B1. Realizări științifice și profesionale

1. Introducere

Necesarul de energie în general și în special cea electrică este corelat, azi mai mult decât oricând, cu dezvoltarea societății, care în ultimii ani este una foarte rapidă.

Dezvoltarea economică puternică din ultimii ani a țărilor mai puțin dezvoltate, accesul la un trai decent și chiar confortabil al unui număr din ce în ce mai mare de oameni face ca nevoia de energie să crească exponențial. De asemenea, asistăm azi la schimbări climatice destul de importante puse de oamenii de știință pe seama poluării.

Toate aceste aspecte cer imperios dezvoltarea unor noi tipuri de energie nepoluante și pe cât se poate nemonopolizante și/sau perfecționarea celor deja existente. Categoria care răspunde cel mai bine acestor cerințe este categoria energiilor regenerabile sau alternative. Vom enumera câteva dintre ele: energia solară convertită în energie electrică și energie termică, energia eoliană, energia geotermală, energia valurilor, biomasa și altele.

Energia electrică produsă de sistemele fotovoltaice joacă astăzi un rol din ce în ce mai important. Începând cu anul 2013, investițiile făcute au dus pentru prima dată în istorie la următorul fapt: puterea instalată în domeniul fotovoltaic la nivel mondial, de 39 GW, a depășit puterea instalată în domeniul eolian la nivel mondial, care a fost 35 GW, vezi [1]. Puterea instalată în anul 2016 a fost de 75 GW, ceea ce înseamnă instalarea a peste 31000 de panouri fotovoltaice pe oră [2]. În anul 2017 puterea instalată a crescut cu 98 GW, aproape dublu față de puterea instalată în anul 2015, care a fost de 51GW. Acest fapt se datorează Chinei, care a instalat peste 53 GW, depășind ea singură puterea instalată în 2015 în întreaga lume [3]. Evoluția puterii instalate în domeniul fotovoltaic [3] din 2004 până la finalul anului 2017 este prezentată în Fig. 1.

Dinamica domeniului este susținută foarte convingător și de numărul de locuri de muncă create. Astfel, din totalul de peste 10 milioane de locuri de muncă create în domeniul energiilor regenerabile, direct sau indirect, peste 4 milioane sunt datorate energiei solare și peste 3.3 milioane energiei solare fotovoltaice [3].

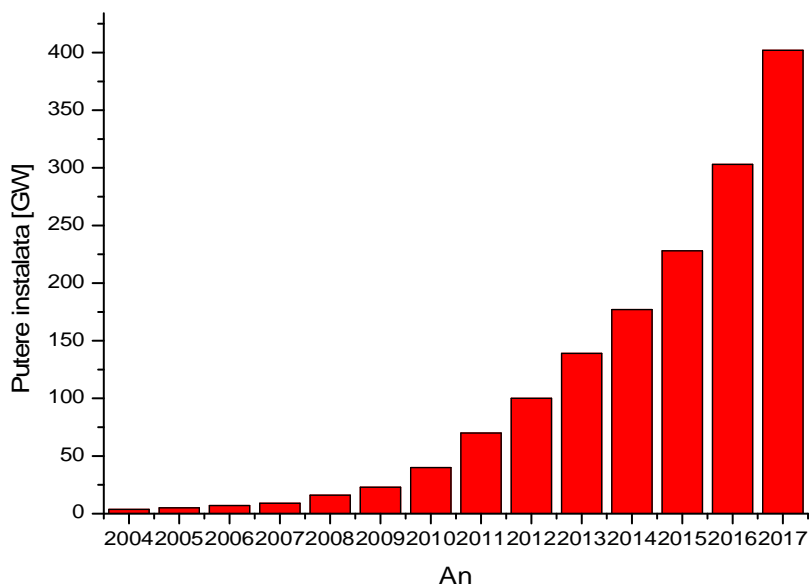


Fig. 1. Puterea instalată în domeniul fotovoltaic

Deoarece celula fotovoltaică este „inima” sistemului fotovoltaic, în teza de abilitare sunt prezentate contribuțiile autorului la: dezvoltarea de noi metode și sisteme electronice care permit caracterizarea celulelor și panourilor fotovoltaice în diferite condiții de iluminare, utilizarea acestora în sisteme hibride noi și pentru diferite aplicații importante ale acestora.

Astăzi există o mare diversitate de celule fotovoltaice. Această diversitate a apărut din dorința cercetătorilor de a obține celule fotovoltaice cât mai performante, la prețuri accesibile, sau altfel spus raportul preț calitate să fie optim.

Câteva dintre cele mai reprezentative tipuri de celule fotovoltaice, create în laboratoarele de cercetare, nu industriale, sunt prezentate în Tabelul 1 [4]. Eficiența teoretică pentru celulele de siliciu monocristalin este de 31-32% și este aproape atinsă. Astăzi se cercetează asiduu în domeniul celulelor fotovoltaice cu multijoncțiune (în general cu joncțiune triplă sau cvadruplă) folosite mai ales în lumină concentrată și al celulelor Perovskite care au avut o creștere susținută a eficienței într-un interval mic de timp, astfel aceasta crescând de la 12% în 2013 la aproape 21% în 2018. În cazul celulelor industriale de siliciu monocristalin firma SunPower a dezvoltat celulele fotovoltaice Maxeon care au toată suprafața iluminată activă, toate contactele fiind pe spatele celulei. Celulele Maxeon de generația a treia au o eficiență de peste 23%, iar panourile de serie X ajung la o eficiență de peste 22% și generează o putere cu 44% mai mare decât cele convenționale și au o rată de degenerare mai mică, aceasta ducând la o creștere a puterii generate, pe durata de viață standard acceptată azi - 25

de ani, de peste 75% [5]. În Fig. 2 este prezentată celula Maxeon comparativ cu cea clasică de siliciu monocristalin.

Tabelul 1. Eficiența celor mai reprezentative tipuri de celule fotovoltaice în condiții standard de măsurare

Tip de celulă	Eficiența [%]	Producător
Siliciu monocristalin	25.8	FhG-ISE
Siliciu multicristalin	22	Jinko solar
GaAs - strat subțire	28.8	Alta Devices
CIGS	21.7	Solar Frontier
CdTe	21	First Solar
Organice - strat subțire	11.2	Toshiba
Multijoncțiune InGaP/GaAs/InGaAs	37.9	Sharp
Perovskite	20.9	KRICT

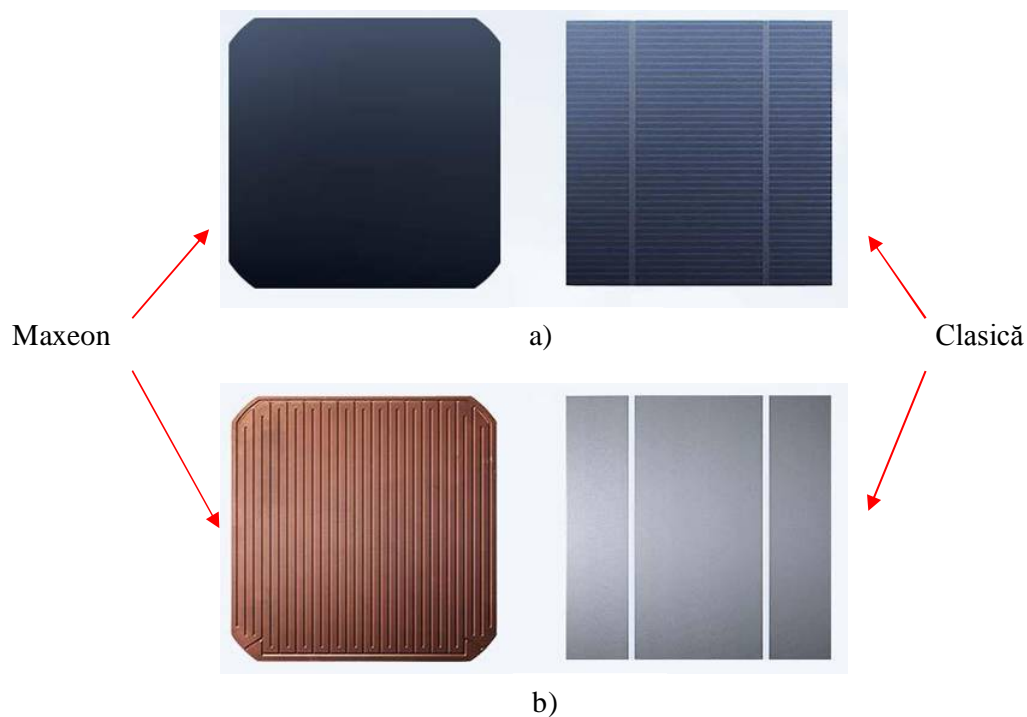


Fig. 2. Maxeon vs. Clasică: a) fața iluminată (superioară); b) spatele celulelor

2. Caracterizarea celulelor fotovoltaice

Celula fotovoltaică poate fi caracterizată atât în regim static (curent continuu) cât și în regim dinamic (curent alternativ).

2.1. Caracterizarea celulelor fotovoltaice în regim static

Caracteristica curent-tensiune, I-U, este cea mai importantă unealtă folosită pentru caracterizarea celulelor fotovoltaice în regim static. Măsurarea caracteristicii poate fi realizată atât în condiții de iluminare, cât și în condiții de întuneric. Ridicarea caracteristicii I-U se realizează în cadranele III, IV și I. Cea mai importantă parte este cea din cadranul IV. Pentru o înțelegere mai ușoară, porțiunea caracteristicii din cadranul IV este rotită în jurul axei tensiune și apare astfel în cadranul I, (vezi Fig. 3).

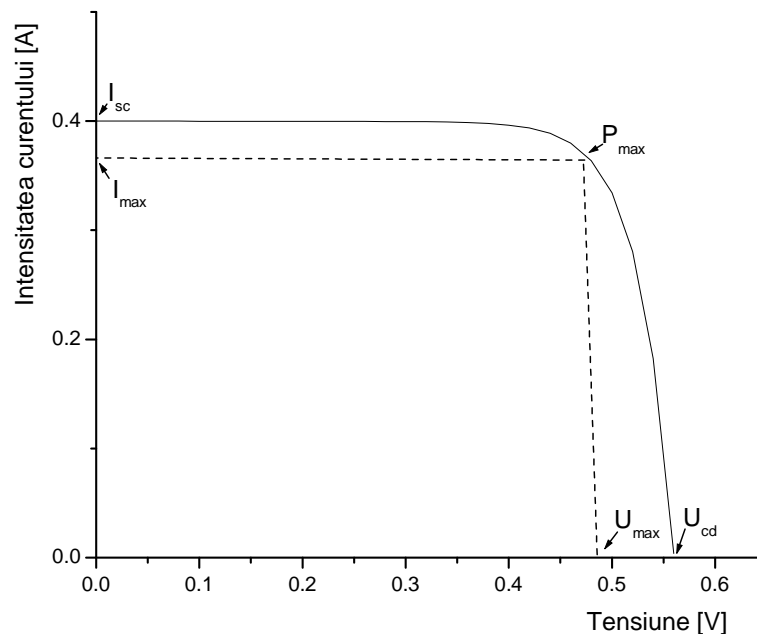


Fig. 3. Caracteristica I-U pentru o celulă fotovoltaică

Analiza caracteristicilor curent-tensiune și putere-tensiune, P-U (Fig. 4.), permite determinarea parametrilor importanți ai celulelor fotovoltaice.

Parametrii cum ar fi curentul de scurt circuit, I_{sc} , tensiunea de circuit deschis, U_{cd} , puterea maximă, P_{max} , și coordonatele punctului de putere maximă (U_{max} , I_{max}) pot fi determinați direct utilizând cele două caracteristici.

Eficiența celulelor fotovoltaice se calculează folosind următoarea formulă:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{A \times I_T} \quad (1)$$

unde A reprezintă aria celulei fotovoltaice, iar I_T este iradianța.

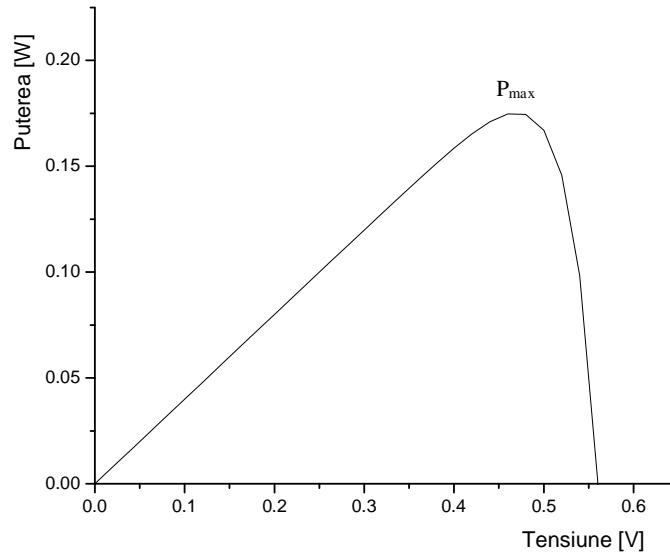


Fig. 4. Caracteristica P-U pentru o celulă fotovoltaică

Deoarece pentru a măsura iradianța este nevoie de un piranometru sau o celulă fotovoltaică de referință, se introduce un alt parametru ce poate fi folosit pentru analiza performanțelor celulelor fotovoltaice și anume factorul de umplere. Formula de calcul pentru factorul de umplere (FF) folosește doar parametrii care se pot determina de pe cele două caracteristici și este dat de următoarea relație:

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} \times U_{cd}} = \frac{I_{\max} \times U_{\max}}{I_{sc} \times U_{cd}} \quad (2)$$

adică raportul ariilor ce dau puterea maximă reală și „puterea maximă ideală”.

Pentru a putea determina ceilalți parametri ai celulelor fotovoltaice în regim static se folosesc circuitele echivalente și modelele matematice ce descriu comportamentul acestora. În lucrare ne vom opri doar la două dintre ele și anume cele mai folosite: modelul *o diodă* și modelul *două diode*.

Celula fotovoltaică este reprezentată ca un generator de curent și o diodă, iar dacă se consideră și rezistențele parazite, rezistența serie, R_s , și rezistența șunt, R_{sh} ,

circuitul echivalent este cel din Fig. 5, iar modelul matematic denumit modelul o diodă este descris de ecuația (3).

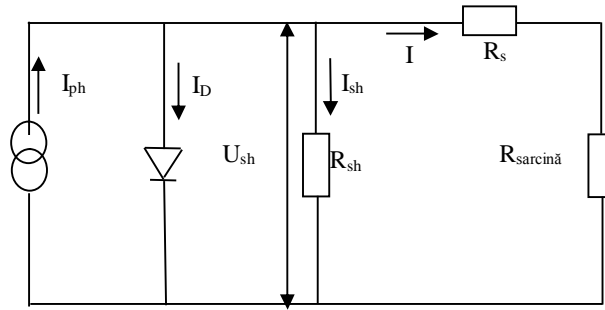


Fig. 5. Circuitul echivalent pentru modelul o diodă

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp\left(\frac{U + IR_s}{mU_t}\right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

unde I_{ph} este curentul fotogenerat, I_o este curentul invers de saturație, m este factorul de idealitate al diodei, iar $U_t = kT/q$ reprezintă tensiunea termică, k este constanta lui Boltzmann, T temperatura celulei fotovoltaice și q este sarcina electrică elementară.

Considerându-se mecanismele de difuzie și generare/recombinare ce au loc în celulele fotovoltaice, circuitul echivalent devine mai complex, (vezi Fig. 6), iar modelul matematic care descrie comportamentul acestora este modelul două diode, vezi ecuația (4).

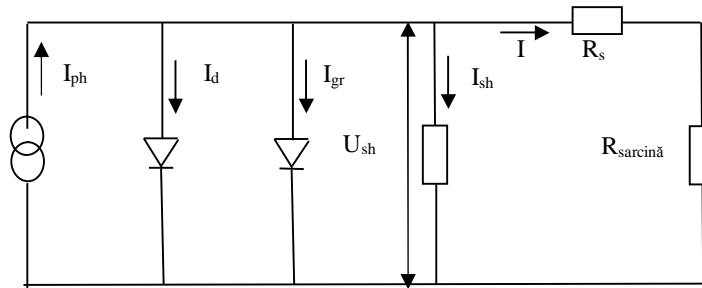


Fig. 6. Circuitul echivalent pentru modelul două diode

$$I = I_{ph} - I_{od} \left(\exp\left(\frac{U + IR_s}{m_d U_t}\right) - 1 \right) - I_{ogr} \left(\exp\left(\frac{U + IR_s}{m_{gr} U_t}\right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

unde d este indexul pentru mecanismul de difuzie, iar gr reprezintă indexul pentru mecanismul de generare/recombinare.

În cazul în care măsurătorile sunt realizate la întuneric, caracteristica curent tensiune este reprezentată semilogaritmice, (vezi Fig. 7). Modelul matematic o diodă ce descrie comportamentul celulei fotovoltaice se modifică și este dat de relația (5).

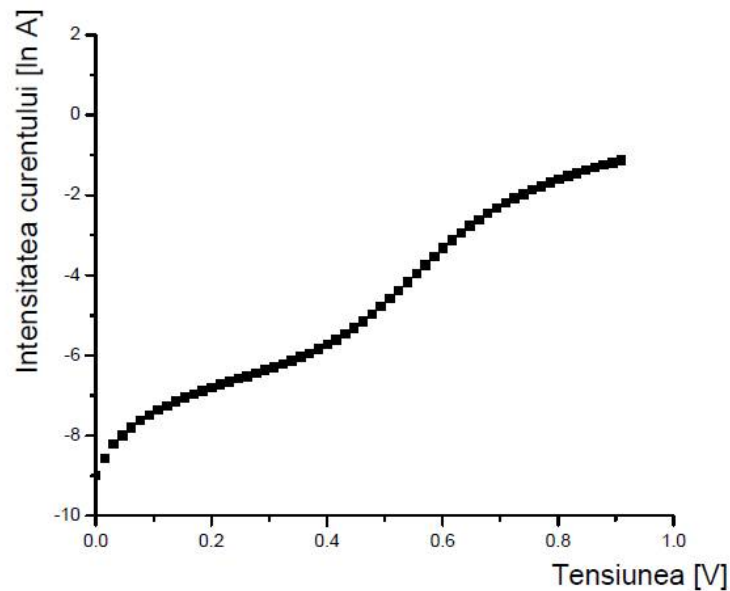


Fig. 7. Caracteristica I-U semilogaritmice pentru o celulă fotovoltaică

$$I = I_o \left(\exp \left(\frac{U + IR_s}{mU_t} \right) - 1 \right) + \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

2.2. Caracterizarea celulelor fotovoltaice în regim dinamic

Panourile fotovoltaice au fost utilizate la început în special pentru generarea energiei electrice în sisteme individuale, numite „stand alone”. Datorită cercetărilor, impulsurilor generate de crizele de petrol și a schimbărilor climatice, dar în special a reducerii prețului per Watt generat și a subvențiilor primite, instalarea fermelor fotovoltaice de mică și mare capacitate cu conectare directă la rețeaua electrică a cunoscut o creștere semnificativă.

În situațiile prezentate, sistemele fotovoltaice au în componență, printre alte componente, regulatoare DC-DC și invertoare. Utilizarea acestor componente impune o caracterizare a celulelor și panourilor fotovoltaice în regim dinamic.

Caracterizarea și determinarea parametrilor celulei fotovoltaice în regim dinamic se realizează pornind de la circuitul echivalent. Acesta se obține înlocuind dioda din circuitul echivalent în regim static cu capacitatea de difuzie, C_d , capacitatea de tranziție,

C_t (barieră) și rezistența dinamică, R_d , vezi Fig. 8a. Deoarece capacitatea de difuzie și cea de tranziție sunt în paralel, se pot înlocui cu capacitatea paralelă, C_p . În mod similar se poate simplifica circuitul și pentru rezistențe, înlocuindu-se rezistența dinamică și rezistența șunt prin rezistența echivalentă numită rezistență paralelă, R_p , vezi Fig. 8b [11].

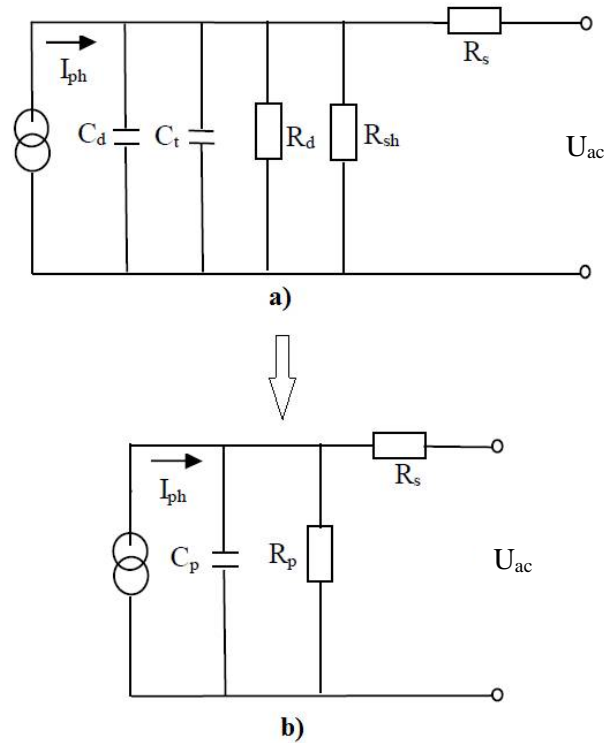


Fig. 8. Circuitul echivalent pentru celulele fotovoltaice în regim dinamic (de bază și cel simplificat) [11]

Calculul impedanței dinamice a celulei fotovoltaice în funcție de tensiunea aplicată și de frecvența semnalului se poate face utilizând relația (6):

$$Z(U, \omega) = R(U, \omega) + jX(U, \omega) = R_s + \left\{ \frac{[R_{sh} + R_d(U)]R_{sh}R_d(U)}{\omega^2 R_{sh}^2 R_d^2(U) [C_d(U, \omega) + C_t(U)]^2 + [R_{sh} + R_d(U)]^2} \right\} - j \left\{ \frac{\omega R_{sh}^2 R_d^2(U) [C_d(U, \omega) + C_t(U)]}{\omega^2 R_{sh}^2 R_d^2(U) [C_d(U, \omega) + C_t(U)]^2 + [R_{sh} + R_d(U)]^2} \right\} \quad (6)$$

Relația (6), utilizând legarea în serie și paralel a componentelor, poate fi rescrisă [6], vezi relația (7):

$$Z(U, \omega) = \left[R_s + \frac{R_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] - j \left[\frac{\omega R_p^2 C_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] \quad (7)$$

Mărimile dinamice din ecuațiile de mai sus pot fi calculate utilizând relațiile (8-10): rezistența dinamică este dependentă doar de tensiune, nu și de frecvență ec. (8) [7], capacitatea de difuzie este dependentă atât de tensiune, cât și de frecvență ec. (9) și capacitatea de tranziție doar de tensiune, nu și de frecvență ec.(10):

$$R_d = \frac{kTm}{qI} \quad (8)$$

$$C_d = \frac{\tau q}{2kT} I_o \exp\left(\frac{qV_a}{mkT}\right), \quad w\tau \ll 1 \quad (9)$$

unde τ reprezintă timpul de viață a purtătorilor minoritari, iar w este frecvența semnalului [8].

$$C_i = \frac{b}{\sqrt{U_j - U_a}} = A \sqrt{\frac{qN\epsilon_o\epsilon_r}{2(U_j - U_a)}}, \quad N = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \quad (10)$$

unde U_j este tensiunea joncțiunii, U_a reprezintă tensiunea aplicată, b este o constantă a cărei valoare depinde de tipul de celulă fotovoltaică, A este aria celulei fotovoltaice, ϵ_o și ϵ_r reprezintă permitivitatea vidului și relativă a materialului din care este făcută celula fotovoltaică, iar N_D și N_A concentrațiile de dopaj pentru regiunile n și p [7,8].

Circuitul echivalent prezentat în Fig. 8b trebuie adaptat datorită unei varietăți mari de celule fotovoltaice. Pentru a realiza noile circuite, dar și pentru analiza și determinarea parametrilor de curent alternativ (AC) ai celulelor fotovoltaice se utilizează diagrama Nyquist, (vezi Fig. 9). Diagrama Nyquist sau Loci este reprezentarea grafică a impedanței imaginare în funcție de impedanța reală. Utilizând această diagramă se pot determina direct rezistența serie și rezistența paralelă a celulei fotovoltaice [9,10]. Rezistența serie se determină ca valoarea abscisei punctului de intersecție dintre grafic și axa impedanței reale. Rezistența paralelă a celulei fotovoltaice este egală cu diametrul semicercului, (vezi Fig. 9). Pentru a determina alți parametri se face fitarea acestui grafic utilizând unelte software dedicate. Datorită unei game variate de celule fotovoltaice, circuitul echivalent simplu trebuie regândit. Acuratețea determinării parametrilor depinde de alegerea parametrilor inițiali și de alegerea circuitului de fitare.

Circuitul echivalent se alege și în funcție de diagrama Nyquist obținută prin măsurători. În Fig. 10 sunt prezentate diferite circuite echivalente utilizate, propuse într-un articol ISI (vezi referința [11]).

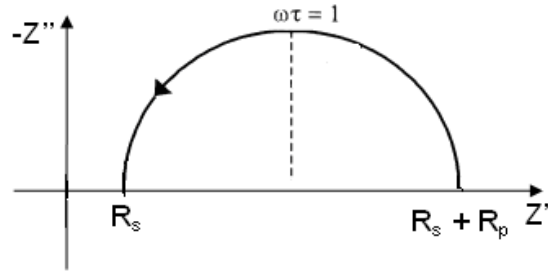
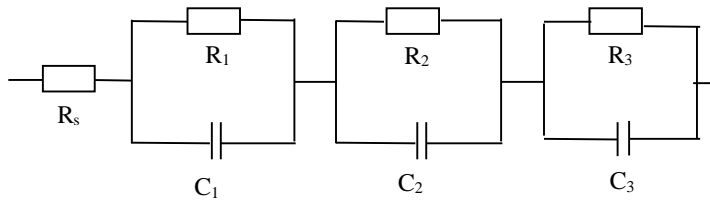
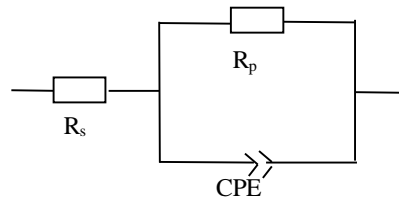


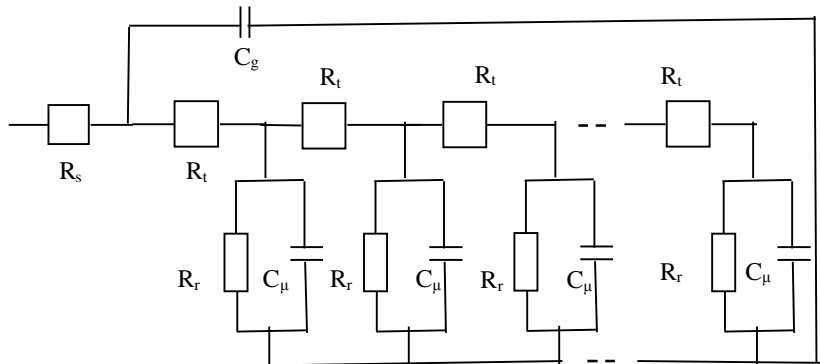
Fig. 9. Diagrama Nyquist [9]



a)



b)



c)

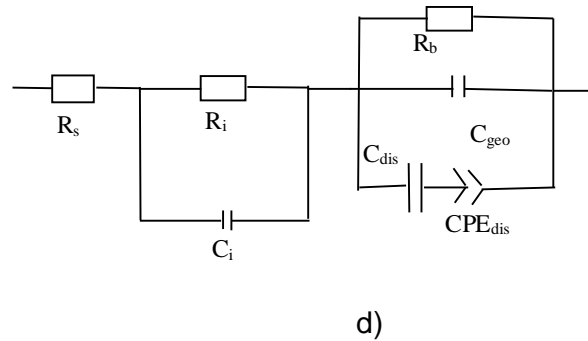


Fig. 10. Circuite echivalente în regim dinamic pentru celulele fotovoltaice

- a) pentru celule dye-sensitized - DSSC a căror diagramă Nyquist are mai multe semicercuri;
- b) pentru celule fotovoltaice organice și pe bază de polimer – este înlocuit condensatorul cu un element de fază constantă (CPE);
- c) circuit linie de transmisie – mecanismul de difuzie și recombinare;
- d) circuit pentru celule organice cu inter strat de TiO_x ; [11]

2.3. Metode de determinare a parametrilor celulelor fotovoltaice

Determinarea parametrilor celulelor fotovoltaice este crucială pentru realizarea panourilor fotovoltaice cu eficiență ridicată [12], pentru maximizarea timpului de viață a acestora și pentru a putea estima corect cantitatea de energie generată de panourile fotovoltaice în condiții de lucru reale.

Producătorii de panouri fotovoltaice determină parametrii importanți și coeficienții de temperatură corespunzători ai acestora în condiții standard de testare (STC). Este acceptat și un al doilea standard, mai ales în cercetare, condiții nominale de operare (NOCT), dar mai puțin utilizat în mediul industrial. Condițiile ce trebuie îndeplinite sunt prezentate mai jos:

- STC (standard test conditions) – condițiile de măsură sunt: iradianța $I = 1000 \text{ W/m}^2$, temperatura $T = 25^\circ\text{C}$, iar masa de aer $\text{AM} = 1.5$;
- NOCT (nominal operating cell temperature) – condițiile de măsură sunt: iradianța $I_T = 800 \text{ W/m}^2$, temperatura $T = 20^\circ\text{C}$, viteza vântului este de 1 m/s , iar unghiul de înclinare al celulei sau panoului fotovoltaic este de 45° .

2.3.1. Metode de determinare a parametrilor de curent continuu

În lucrarea publicată în jurnalul *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, autorii Cotfas DT et al. [13] prezintă pentru prima dată un studiu de sinteză și analiză complet despre metodele de determinare a parametrilor de curent continuu (DC) ai celulelor fotovoltaice până în anul 2013. Existau studii despre determinarea rezistenței serie sau despre factorul de idealitate al diodei [14,15], însă acest studiu analizează pro și contra 35 de metode dezvoltate de cercetători pentru determinarea parametrilor DC ai celulelor fotovoltaice: curentul fotogenerat, curentul invers de saturație, factorul de idealitate al diodei, rezistența serie și rezistența șunt [16-33]. Metodele au fost clasificate în metode ce permit determinarea tuturor parametrilor importanți ai celulelor fotovoltaice și metode ce permit determinarea unuia sau a mai multor parametri, dar nu toți. O altă clasificare a metodelor de determinare a parametrilor celulelor fotovoltaice se datorează condițiilor de măsură: în condiții de iluminare, care poate fi naturală sau artificială și în condiții de întuneric. Metodele mai pot fi clasificate în funcție de procedeele utilizate pentru determinarea parametrilor celulelor fotovoltaice în metode analitice, metode de determinare prin fitare liniară și non liniară și metode care folosesc modele teoretice și analize grafice în același timp [13]. În cadrul metodelor, cel mai utilizat model pentru determinarea parametrilor DC este modelul *o diodă* – cinci parametri. Mai este folosit și modelul *două diode* – șapte parametri. Cei doi parametri suplimentari apar datorită celor două mecanisme luate în considerare, mecanismul de difuzie și mecanismul de generare recombinare pentru curentul invers de saturație și factorul de idealitate al diodei [13]. Lucrarea a avut un impact major și ca urmare un feedback bun, astfel ea fiind citată de peste 80 de ori, multe dintre citări fiind în jurnale cu factor de impact mare.

De asemenea, în lucrarea mai sus menționată este prezentată o metodă îmbunătățită a metodei Cotfas [31] pentru determinarea rezistenței serie și a rezistenței șunt a celulelor fotovoltaice. Metoda Cotfas a fost dezvoltată în cadrul tezei de doctorat și publicată ulterior obținerii titlului de doctor în jurnalul *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* [31]. Determinarea rezistențelor parazite serie și șunt se realizează utilizând relațiile (11) și (12), unde ΔU se obține făcând diferența dintre tensiunea corespunzătoare punctului de putere maximă de pe caracteristica I-U măsurată și tensiunea de pe caracteristica I-U ideală – valoarea rezistenței serie este 0, a celei șunt infinită, iar factorul de idealitate este considerat egal cu 1, cel teoretic, iar ΔI se obține făcând diferența dintre intensitatea curentului, corespunzătoare punctului de putere

maximă de pe caracteristica I-U măsurată, și intensitatea curentului de pe caracteristica I-U ideală, vezi Fig. 11.

Deoarece în foarte multe metode prezentate, factorul de idealitate era considerat cel teoretic, metoda îmbunătățită arată eroarea care se face în acest caz. Pentru aceasta se consideră o a treia caracteristică I-U a celulei fotovoltaice care este una ideală, dar cu factorul de idealitate real – calculat în prealabil. Se poate observa din Fig. 11 că atât ΔU , cât și ΔI se modifică semnificativ, astfel că valorile rezistențelor parazite se modifică și ele. Utilizând noua metodă crește acuratețea determinării celor două rezistențe și se arată o deficiență a metodelor care utilizau valoarea 1 pentru factorul de idealitate al diodei.

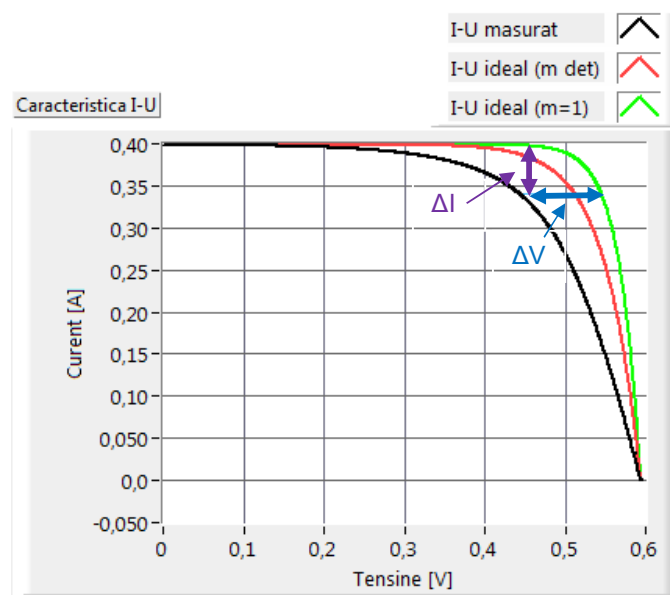


Fig. 11. Caracteristicile măsurată, ideală cu m determinat și ideală $m = 1$ [31]

$$R_s = \frac{\Delta U}{I_{\max}} \quad (11)$$

$$R_{sh} = \frac{U_{\max}}{\Delta I} \quad (12)$$

A doua metodă propusă de autor pentru determinarea parametrilor celulelor fotovoltaice a fost prezentată la conferința Optim 2010 și publicată în IEEEExplore [35]. Metoda permite determinarea a patru parametri: I_o , m , R_s și R_{sh} , dar poate fi ușor modificată pentru a determina și al cincilea parametru I_{ph} . Metoda constă în rezolvarea unui sistem neliniar cu patru ecuații și patru necunoscute – cei patru parametri. Sistemul se rezolvă cu ajutorul programului dezvoltat în mediul LabVIEW. Ecuațiile sistemului

neliniar sunt date de modelul matematic o *diodă*, ecuația (3), modificat conform cu ecuația (13), unde R_i reprezintă rezistența legată în serie cu rezistența serie a celulei fotovoltaice și anume 0 mΩ, 50 mΩ, 100 mΩ și 200 mΩ, (vezi Fig. 12).

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{U + I(R_s + R_i)}{mU_t} \right) - 1 \right) - \frac{U + I(R_s + R_i)}{R_{sh}} \quad (13)$$

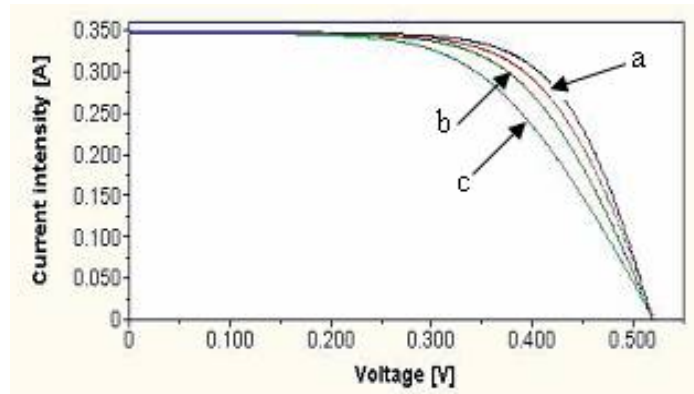


Fig. 12. Caracteristicile I-U ale celulei fotovoltaice pentru: a) rezistență serie de 50 mΩ; b) rezistență serie de 100 mΩ; c) rezistență serie de 200 mΩ [35]

Pentru a determina parametrii celulelor fotovoltaice cu acuratețe ridicată în ultimii ani s-au dezvoltat și folosit cu precădere metode metaeuristice – algoritmi dezvoltați în general plecând de la fenomene naturale. Deoarece modelele matematice o *diodă* sau *două diode* ale celulelor fotovoltaice prezintă funcții multimodale, determinarea parametrilor necesită metode pentru determinarea optimului global și care să nu se oprească odată găsit un optim local.

În acest sens în lucrarea prezentată la conferința ISETC 2018, Cotfas et al. [36], este dezvoltată o metodă bazată pe algoritm genetic pentru determinarea parametrilor celulelor fotovoltaice. Dezvoltarea algoritmului a fost realizată în limbajul de programare R, care este dedicat calculului statistic și interpretării grafice, utilizând biblioteca existentă pentru algoritmul genetic.

Definirea funcției obiectiv pentru algoritmul genetic este modelată plecând de la ecuația (3) și e descrisă de relația (14), unde n reprezintă numărul de măsurători luate în considerare.

$$f(U, I) = \sum_{i=1}^n \left| I_i - I_{ph} + I_o \left(\exp \left(\frac{U_i + I_i R_s}{mU_t} \right) - 1 \right) + \frac{U_i + I_i R_s}{R_{sh}} \right| \quad (14)$$

Pentru validarea metodei au fost parcuși următorii pași:

- testarea a două celule fotovoltaice de siliciu monocristalin, SC1 cu dimensiunile de 3 cm x 3 cm, SC2 cu dimensiunile de 8 cm x 8 cm și a unui panou fotovoltaic cu 18 celule fotovoltaice de siliciu monocristalin, celulele având dimensiunile de 3 cm x 8 cm, conectate în serie;
- au fost comparate valorile obținute cu algoritmul genetic pentru eroarea medie absolută pentru intensitatea curentului, MAE – relația (15), și eroarea medie pătratică, RMSE – relația (16), cu cele găsite folosind una dintre metodele general acceptate din cele 35 prezentate în lucrare [13] și anume metoda celor cinci parametri.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |I_{meas} - I_{est}|}{n} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f^2(V, I)}{n}} \quad (16)$$

Determinarea parametrilor celulelor și panoului fotovoltaic prin algoritmul genetic necesită definirea intervalelor de variație pentru fiecare parametru, dându-se limita minimă și cea maximă. Dacă aceste intervale sunt micșorate, datorită experienței sau a unor rezultate preliminare, convergența se atinge mai repede, reducându-se numărul de iterații. Valorile considerate în experiment sunt prezentate în Tabelul 2.

Tabelul 2. Intervalele de variație pentru parametri [36]

Parametri	Celula fotovoltaică				Panou fotovoltaic	
	SC1		SC2		PV	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
I_{ph} [A]	I_{sc}	$I_{sc} + 0.02$	I_{sc}	$I_{sc} + 0.05$	I_{sc}	$I_{sc} + 0.1$
I_0 [A]	10^{-12}	10^{-5}	10^{-12}	10^{-5}	10^{-12}	10^{-5}
m	1	2	1	2	18	36
R_s [Ω]	0	0.2	0	0.2	0	2
R_{sh} [Ω]	0	500	0	500	0	2000

Caracteristicile I-U măsurate și calculate utilizând parametri determinați prin algoritmul genetic, GA, și metoda celor cinci parametri, pentru celula fotovoltaică SC1 sunt prezentate în Fig. 13.

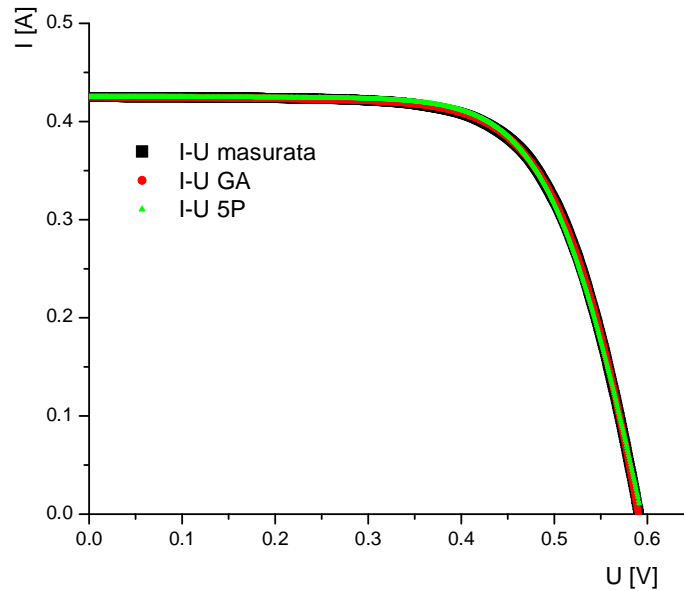


Fig. 13. Caracteristicile curent-tensiune ale celulei fotovoltaice SC1 [36]

Analizând Fig. 13 observăm o foarte bună potrivire a celor trei caracteristici I-U, dar pentru validare considerăm și calculul erorii absolute pentru intensitatea curentului electric, diferența dintre cel măsurat și cel calculat prin cele două metode considerate, vezi Fig. 14.

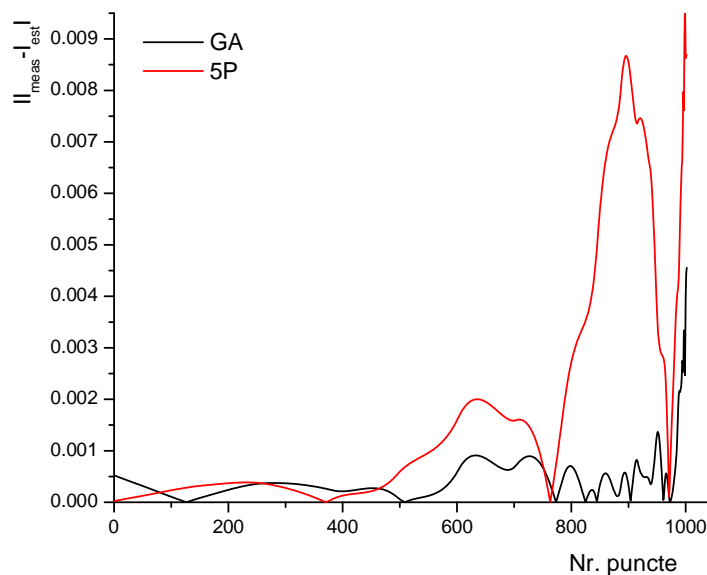


Fig. 14. Eroarea absolută pentru intensitatea curentului [36]

Se observă o foarte bună potrivire pentru prima jumătate, ceea ce arată că cele două metode oferă valori pentru intensitatea curentului electric apropiate de cele reale, dar pentru a doua parte, metoda 5P calculează valori mult mai îndepărtate de cele reale. Cea de a doua parte corespunde regiunii apropiate de tensiunea de circuit deschis.

Tabelul 3. Valorile erorilor pentru cele trei dispozitive analizate [36]

Eroare	Celula fotovoltaică				Panoul fotovoltaic	
	SC1		SC2		PV	
	5P	GA	5P	GA	5P	GA
MABE	0.0016	4.1 E-4	0.025	0.0106	0.0138	4.1 E-3
RMSE	0,00266	5.79 E-4	0.0534	0.0193	0.0286	0.00694

Analizând rezultatele obținute pentru cele două erori considerate, se observă o îmbunătățire considerabilă în cazul utilizării algoritmului genetic pentru determinarea parametrilor celulelor și panoului fotovoltaic (vezi Tabelul 3). RMSE-ul scade în cazul utilizării algoritmului genetic de 4 ori pentru celula SC1 și de peste 2 ori pentru celula SC2. Utilizarea algoritmului genetic conduce la determinarea parametrilor cu o mai mare acuratețe.

Cercetătorii dezvoltă și utilizează algoritmi, chiar doi sau mai mulți algoritmi împreună pentru a reduce RMSE-ul cât mai mult, astfel reușind să crească acuratețea determinării parametrilor, dar și reducerea numărului de iterații, reducând astfel timpul necesar determinării parametrilor. Acest lucru este foarte important pentru producătorii de panouri fotovoltaice, pentru care productivitatea este foarte importantă. În urma colaborării cu colegul Conf. Dr. Adrian Deaconu, Facultatea de Matematică și Informatică am dezvoltat un nou algoritm pentru determinarea parametrilor celulelor fotovoltaice. În lucrarea aflată în proces de recenzie pentru jurnalul Applied Energy [37] este prezentat algoritmul Discretizare succesivă, DS. Rezultatele obținute utilizând algoritmul DS sunt comparate cu cele obținute utilizând cei mai buni algoritmi prezentați în literatura de specialitate, pentru care există setul de date (I,U) utilizat. Compararea s-a făcut pentru celula fotovoltaică comercială de siliciu RTC, panourile PWP201 – siliciu policristalin și STM6-40 siliciu monocristalin, ambele cu 36 celule conectate în serie.

În Tabelul 4 sunt prezentate valorile RMSE-ului obținute pentru diferiți algoritmi din literatura de specialitate: Improved Shuffled Complex Evolution – ISCE, Hybrid Adaptive Nelder-Mead Simplex Algorithm - EHA-NMS, Repaired Adaptive Differential Evolution Rcr-IJADE, Genetic Algorithm – GA și DS. Analizând datele obținute, se observă că

valoarea RMSE-ului obținută cu algoritmul DS este mai mică sau egală cu valorile obținute prin utilizarea altor algoritmi, ceea ce face din algoritmul DS dezvoltat unul foarte performant, ce trebuie considerat.

Tabelul 4. Valorile RMSE obținute utilizând diferiți algoritmi pentru cele trei dispozitive analizate [37]

Algoritm	RMSE		
	RTC	PWP201	STM6-40
DS [37]	9.8598E-04	2.4250749E-03	1.72964500E-03
ISCE [38]	9.860219E-04	2.425075E-03	1.72981371E-03
EHA-NMS [39]	9.860219E-04	2.425075E-03	1.72981371E-03
Rcr-IJADE [40]	9.860219E-04	2.425075E-03	1.72981371E-03
5P [41]	8.674 E-03	4.019E-03	7.17643E-02
GA [42]	0.01908	-	-

2.3.2. Metode de determinare a parametrilor de curent alternativ

Caracterizarea celulelor și panourilor fotovoltaice în regim dinamic a devenit o necesitate odată cu utilizarea lor pe scară largă. În lucrarea publicată în jurnalul *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, autorii Cotfas DT et al. [11] au realizat un prim studiu de sinteză pro și contra pentru metodele ce permit determinarea parametrilor de curent alternativ (CA), ai celulelor și panourilor fotovoltaice. În lucrare sunt analizate cele zece metode existente până la acea dată, cele mai multe dintre aceste metode utilizând tehnica spectroscopiei de impedanță, tehnică dezvoltată în domeniul electrochimiei și preluată, folosind circuite echivalente specifice tipului de celulă fotovoltaică analizată (vezi Fig. 10). Tehnica permite identificarea circuitelor echivalente pentru noile tipuri de celule fotovoltaice, de exemplu dye sau polimer. Măsurătorile pentru determinarea parametrilor CA sunt realizate atât în condiții de iluminare, cât și în întuneric. Metodele permit determinarea unui parametru sau a tuturor parametrilor. De asemenea, se pot determina rezistența serie și rezistența șunt, caracteristice regimului static pentru celulele și panourile fotovoltaice.

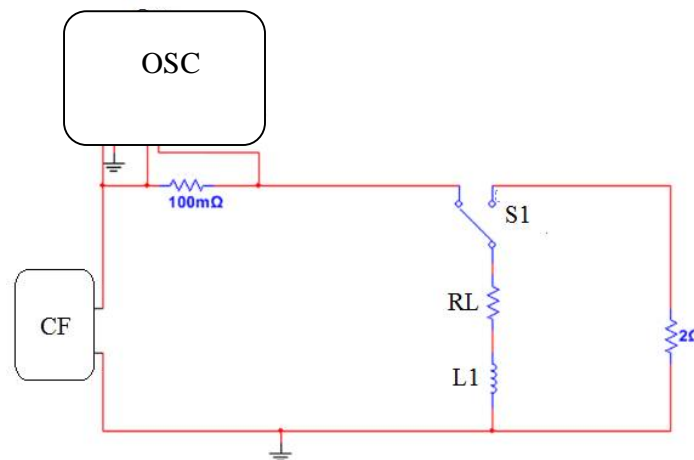
Începând cu anul 2012 s-a dezvoltat o colaborare cu departamentul de Energie de la universitatea Aalborg University, Danemarca. Un rezultat al acestei colaborări este dezvoltarea unei noi metode pentru determinarea unuia dintre parametrii CA ai celulelor fotovoltaice, și anume capacitatea paralelă. Rezultatele au fost publicate în jurnalul *Energies* [43].

Pentru determinarea capacității se folosește un circuit RLC pentru care se determină frecvența oscilației amortizate. Se folosesc bobine cu inductanță diferită ca rezistență de sarcină pentru celula fotovoltaică. Metoda permite determinarea capacității utilizând echipamente de laborator cu cost redus: placa de achiziție NI PCI-MIO-16E-1 (12 biti), un circuit de condiționare realizat în laborator și diferite bobine. Pentru validarea metodei rezultatele obținute au fost comparate cu cele obținute prin metoda spectroscopiei de impedanță. În cazul spectroscopiei de impedanță s-a folosit sistemul Zahner IM6. În general, acest tip de echipament este foarte scump, prețul reflectând funcțiile echipamentului. De asemenea, metoda a fost testată în prealabil utilizând circuitul simulat în mediul National Instruments (NI) Multisim – SPICE simulation, circuit realizat și pentru testarea reală, (vezi Fig. 15a), unde OSC înseamnă osciloscop, iar CF celula fotovoltaică. Oscilațiile amortizate obținute pentru intensitatea curentului și tensiune când bobina este introdusă în circuit prin comutarea lui S1 sunt prezentate în Fig. 15b.

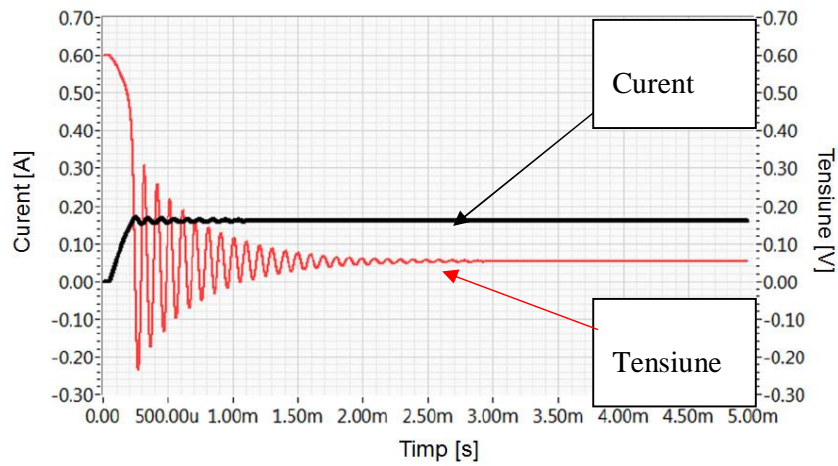
Capacitatea paralelă se obține utilizând relația (17):

$$C_p = \frac{1}{L_1 \left(\omega^2 + \left(\frac{\omega \Delta}{2\pi} \right)^2 \right)} \quad (17)$$

unde L_1 reprezintă inductanța bobinei utilizate, ω este pulsația (determinată) și Δ reprezintă decrementul logaritmic (determinat).



a)



b)

Fig. 15. a) Circuitul utilizat; b) Oscilațiile obținute pentru intensitatea curentului și tensiune [43]

Rezultatele obținute prin metoda dezvoltată - RLC și prin metoda spectroscopiei de impedanță pentru o celulă comercială de siliciu monocristalin încapsulată la diferite nivele de iluminare sunt prezentate comparativ, vezi Fig. 16.

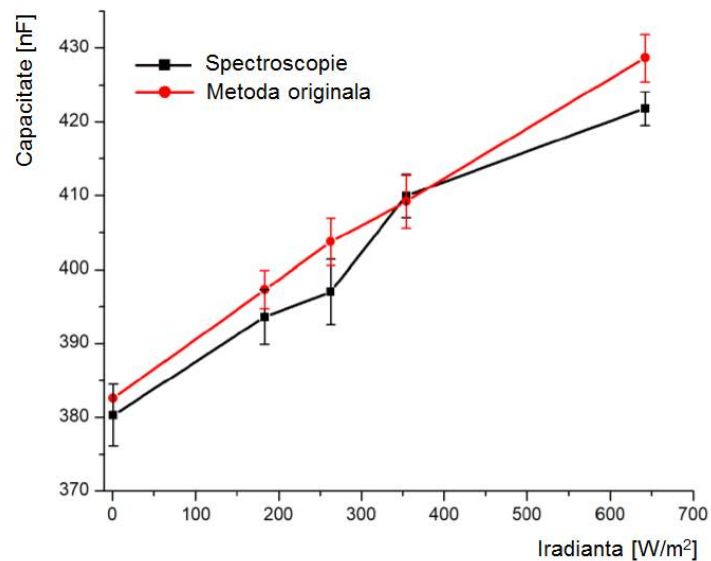


Fig. 16. Capacitatea celulei fotovoltaice pentru diferite nivele de iluminare [43]

Diferența medie dintre valorile obținute prin cele două metode în procente este de 1%, ceea ce demonstrează viabilitatea metodei dezvoltate pentru determinarea capacității paralele a celulelor fotovoltaice.

Deși există dezvoltate metode de determinare a parametrilor celulelor fotovoltaice atât în curent continuu, cât și în curent alternativ, există încă un important interes în această direcție. Așadar, dezvoltarea de noi algoritmi sau adaptarea unora existenți pentru determinarea parametrilor celulelor fotovoltaice cu erori mai mici și un număr mai mic de iterații pentru a reduce timpul necesar determinării parametrilor este o direcție de dezvoltare ulterioară.

2.4. Sisteme de caracterizare a celulelor fotovoltaice

2.4.1. Tehnici de măsurare a caracteristicii I-U

Există mai multe tehnici pentru măsurarea caracteristicii curent-tensiune. O prezentare succintă a acestora este făcută în capitolul din cartea publicată în editura Nova Science Publishers din USA [44]:

- utilizarea sarcinii electronice – se pot folosi în general echipamente cu funcții multiple, de genul: Autolab, Zahner. Aceste aparate, nefiind dedicate numai caracterizării celulelor sau panourilor fotovoltaice, au prețuri ridicate și mobilitate redusă.
- utilizarea MOSFET-ului – pot fi create sarcini electronice mai simple, dedicate măsurătorilor pentru celulele și panourile fotovoltaice (CF), vezi Fig. 17, la costuri reduse și cu o mobilitate ridicată, asigurându-se astfel posibilitatea realizării măsurătorilor atât în laborator, cât și pentru panourile montate în diverse sisteme sau ferme fotovoltaice. Deoarece pentru achiziția de date se folosesc plăci de achiziție care măsoară tensiuni electrice de ± 10 V, în general se folosește un divizor de potențial pentru a putea face măsurători și pentru panourile fotovoltaice a căror tensiune depășește domeniul de măsurare al plăcii de achiziție.

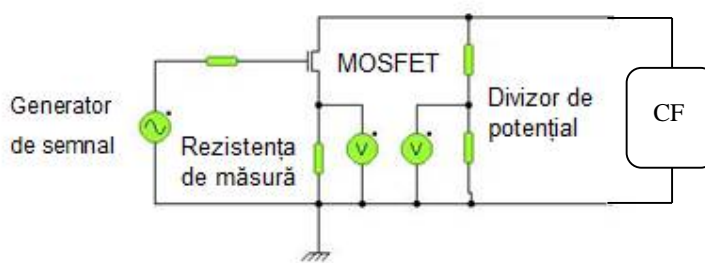


Fig. 17. Schema electrică pentru realizarea unei sarcini electronice cu MOSFET [44]

- utilizarea condensatorului – deoarece condensatorul își modifică impedanța în procesul de încărcare, acesta poate fi utilizat pentru măsurarea caracteristicii I-U a celulelor și panourilor fotovoltaice - CF. În Fig. 18 este prezentată schema electrică. Circuitul electronic trebuie să conțină și un circuit de descărcare a condensatorului pentru a putea relua măsurătorile. Măsurătorile pentru ridicarea caracteristicii curent tensiune, utilizând condensatorul, au o

durată de sub o secundă, ceea ce permite o măsurătoare mai precisă, limitându-se efectele temperaturii asupra parametrilor celulei fotovoltaice. Pentru a se putea face măsurători pentru panourile fotovoltaice se adaugă în circuit un divizor de potențial, la fel ca pentru tehnica cu MOSFET.

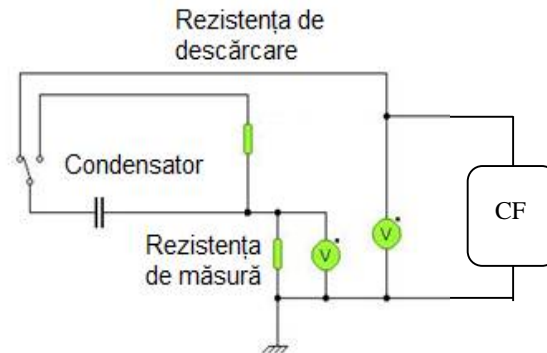


Fig. 18. Schema electrică a circuitului cu condensator [44]

- utilizarea potențiometrului – pentru a varia sarcina se poate utiliza un potențiometru digital, vezi Fig. 19. Pentru a ridica caracteristica I-U a celulei fotovoltaice - CF este necesar ca rezistența de sarcină să varieze, în general, de la $m\Omega$ până la valori de sute de $k\Omega$, iar numărul de puncte de măsură să fie unul suficient de mare pentru a asigura o analiză precisă a măsurătorilor. Acest lucru se poate realiza utilizând o multiplexare de potențiometre digitale.

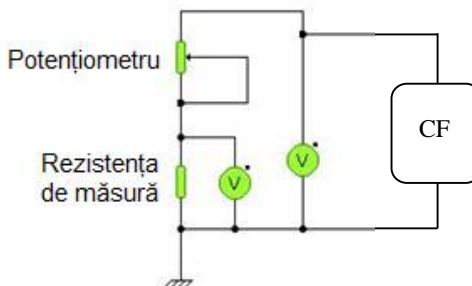
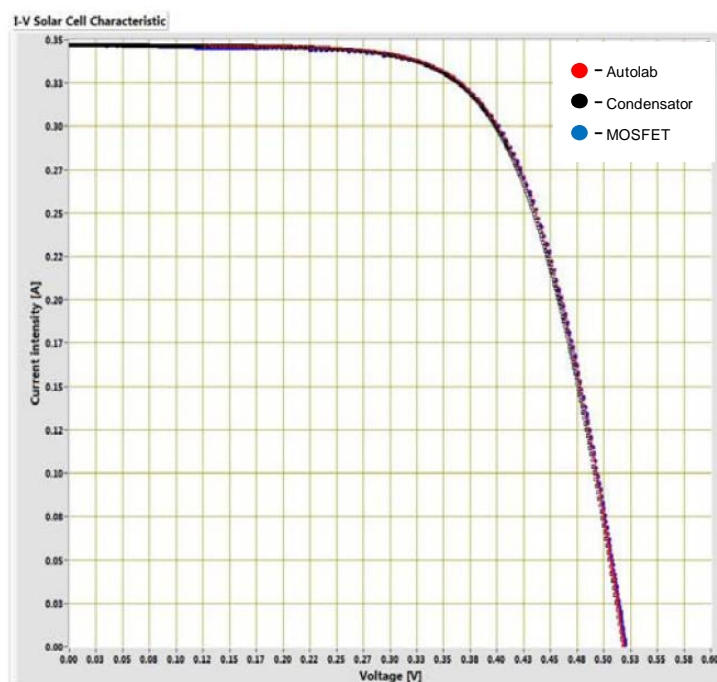


Fig. 19. Schema electrică a circuitului cu potențiometru [44]

Avantajele utilizării tehnicilor condensatorului sau a MOSFET-ului sunt: preț redus, mobilitate ridicată și posibilitatea realizării circuitului de către cercetător. Pentru a verifica acuratețea măsurătorilor prin diferite tehnici s-au realizat măsurători ale caracteristicii I-U cu sarcină electronică utilizând sistemul Autolab și cu circuite realizate în laborator cu condensator și MOSFET. În Fig. 20a este prezentat set-up-ul experimental. Cele două circuite create în laborator s-au utilizat împreună cu platforma educațională NI ELVIS pentru achiziția de date.



a)



b)

Fig. 20. a) Set-up experimental; b) Caracteristicile I-U pentru o celulă fotovoltaică de siliciu monocristalin obținute utilizând Autolab-ul ca sarcină electronică, circuitul cu condensator și cel cu MOSFET [44]

Caracteristicile curent tensiune obținute prin cele trei tehnici de măsurare au fost comparate, obținându-se o foarte bună potrivire, vezi Fig. 20b. Această cercetare arată fără echivoc posibilitatea utilizării oricărei tehnici de măsurare. Alegerea se poate face în funcție de resurse și condițiile de măsurare. Rezultatele măsurătorilor au fost validate prin publicarea lor într-un articol [35] la conferința internațională OPTIM 2010, preluat în IEEEXplore și Web of Science.

2.4.2. Sisteme electronice de caracterizare a celulelor fotovoltaice

Există o multitudine de sistemele electronice care permit caracterizarea celulelor fotovoltaice, dintre care putem enumera: sistemul Sunalyzer [45], sisteme ce folosesc tehnica blitz-ului pentru a evita încălzirea celulelor [46], sisteme create de companii producătoare de aparate de măsură și control precum Keithely [47], Agilent [48] sau Abet Technologies [49].

Componența unui astfel de sistem este în general următoarea [44], vezi Fig. 21:

- sursă de lumină – este important ca spectrul sursei folosită pentru iluminatul celulelor sau panourilor fotovoltaice să se potrivească cu spectrul soarelui pentru ca măsurătorile făcute în laborator să se potrivească cu cele efectuate în lumină naturală. Pentru măsurători de acuratețe ridicată se folosesc simulatoare solare cu lampă de xenon și cu filtre de AM 1.5 (masă de aer). Deoarece acestea sunt foarte scumpe, ajungându-se la prețuri de peste 100000 de Euro pentru simulatoarele cu arie mare dedicate panourilor fotovoltaice, se pot folosi sisteme de iluminat cu becuri de halogen, făcându-se astfel un compromis între preț și calitate.
- sistemul de măsurare a caracteristicii I-U – poate fi un echipament gen Autolab, Agilent, etc. sau un sistem proprietar realizat de cercetători bazat pe una din tehnicile prezentate în secțiunea precedentă.
- termostatul – este necesar pentru a menține temperatura celulei sau panoului fotovoltaic constantă pe timpul măsurătorilor, astfel încât să se evite influența variației temperaturii asupra parametrilor celulei sau panoului.
- actuator – poate fi un actuator liniar sau poate fi realizat un sistem de variație a distanței dintre celula sau panoul fotovoltaic și sursa de lumină, utilizând de exemplu un motor pas cu pas. Sistemul de variație este necesar pentru a putea măsura caracteristica I-U la diferite nivele de iluminare.
- camera obscură – este necesară pentru a evita iluminarea accidentală a celulei sau panoului fotovoltaic cu alte surse de lumină. Poate fi folosită o cameră termică care poate îndeplini ambele funcții atât de termostatare, cât și de evitare a altor surse de iluminat, dezvoltată de autor, vezi [50].
- PC – calculatorul cu aplicațiile software aferente pentru controlul sistemelor de măsurare și poziționare, achiziția și stocarea datelor și prelucrarea ulterioară a acestora.

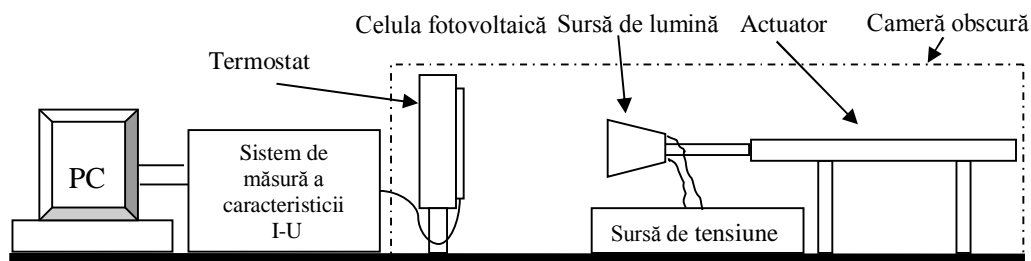


Fig. 21. Set-up-ul experimental pentru caracterizarea celulelor fotovoltaice [44]

Pentru realizarea măsurătorilor în regim dinamic, sistemul de măsurare pentru caracteristicile curent tensiune se înlocuiește cu unul ce permite măsurarea diagramelor Nyquist, sisteme precum Autolab sau Zahner [11].

Intuind importanța, necesitatea studierii și implementarea în societate a surselor de energie alternative (denumite și surse de energii regenerabile) în planul de învățământ al diferitelor programe de studii din universitate au fost introduse materii la care studenții deprind competențele necesare pentru a lucra cu succes în domenii precum energie solară, energie eoliană, biomasă, etc. Astfel la secția de Inginerie Fizică a fost introdus cursul de Fizica și tehnologia sistemelor fotovoltaice, la programul de studii Electronică Aplicată au fost introduse cursurile de Optoelectronică și Surse de energie alternative, a căror titular de curs am fost sau sunt. Provocarea apărută odată cu lansarea acestor cursuri a fost aceea de a realiza lucrările de laborator aferente.

Existența în cadrul departamentului Electronică și Calculatoare a platformelor educaționale NI ELVIS, obținute ca urmare a grantului „Measurements and Instrumentation” al cărui membru am fost, a creat premisele realizării unui set de lucrări de laborator noi în domeniul caracterizării celulelor și mini panourilor fotovoltaice, folosind tehnologie inovatoare, fără costuri foarte mari.

Încă de la început, conceptul sistemului de caracterizare dezvoltat împreună cu domnul Conf. Dr. Petru Adrian Cotfas a fost să poată fi folosit atât de studenții de la programele de licență și masterat, cât și de cei de la doctorat, adică să poată fi folosit și în cercetare.

Sistemul electronic de caracterizare a celulelor fotovoltaice dezvoltat se bazează pe un concept general acceptat, descris mai sus, (vezi Fig. 21), dar folosindu-ne de facilitățile platformei NI ELVIS oferită de National Instruments [51].

Prima versiune a sistemului electronic de caracterizare a celulelor fotovoltaice, denumit SolarLab, este prezentată în Fig. 22. Sistemul este compus din:

- platforma NI ELVIS, pe a cărei placă de prototipare a fost realizat circuitul electronic de măsurare a caracteristicii curent tensiune, folosind tehnica condensatorului.
- sistemul de poziționare al celulei fotovoltaice, care conține și un sistem de încălzire al cărui rol este de a varia temperatura celulei fotovoltaice de la temperatura camerei până la 80°C și de a o menține cvasiconstantă pe timpul măsurătorilor.
- dispozitivul XY graf este utilizat pentru a putea varia nivelul de iluminare a celulei fotovoltaice de la 100 W/m² până la 1000 W/m² prin variația distanței și pentru a varia unghiul dintre celula fotovoltaică și sursa de iluminat. Pentru iluminare s-a folosit un bec de halogen.
- PC cu aplicația software proiectată și implementată în limbajul de programare grafică LabVIEW pentru controlul sistemului, achiziția datelor și prelucrarea în timp real sau ulterioară a acestora [52].

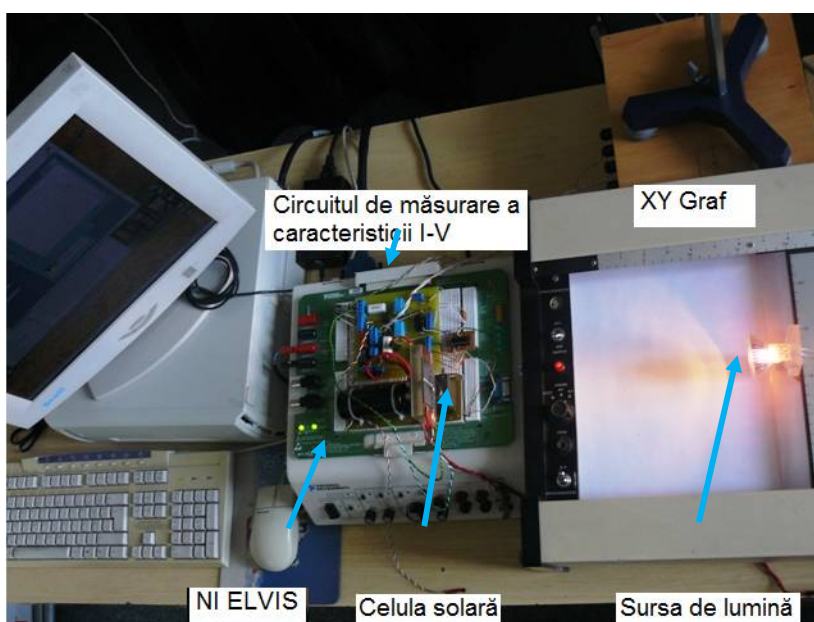


Fig. 22. Prima versiune a sistemului SolarLab [52]

Realizarea unui sistem electronic compact cu dimensiuni reduse și cu performanțe îmbunătățite a condus la a doua versiune a sistemului SolarLab. Astfel pentru sistemul de măsurare și control s-a proiectat și implementat un PCB cu conexiune directă la platforma educațională NI ELVIS, (vezi Fig. 23). Pentru variația iluminării celulelor fotovoltaice s-a realizat un circuit de control al tensiunii electrice ce cade pe rezistența

becului, înlocuindu-se dispozitivul XY graf. De asemenea s-a montat celula și sistemul de încălzire pe axul unui motor pas cu pas, utilizat pentru a varia unghiului dintre planul celulei fotovoltaice și direcția fluxului luminos.

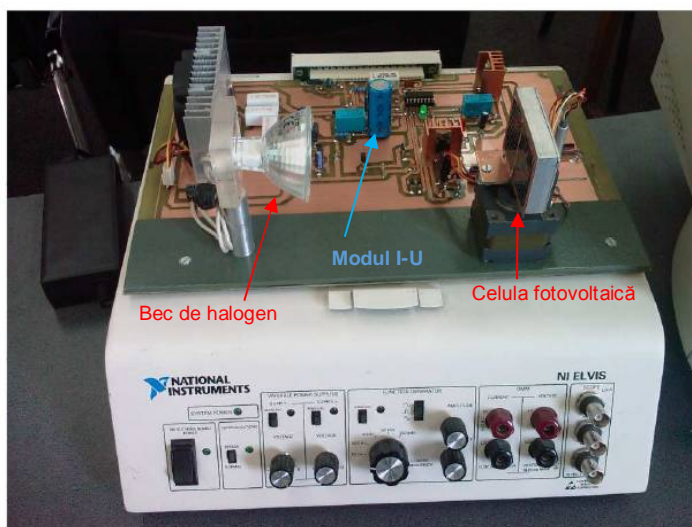


Fig. 23. A doua versiune a sistemului SolarLab [52]

O nouă versiune a sistemului SolarLab a fost proiectată și realizată odată cu apariția noii platforme educaționale NI ELVIS II+. Dotarea laboratorului cu NI ELVIS II+ s-a realizat ca urmare a unei colaborări fructuoase cu firma National Instruments SUA [53]. Noutatea adusă sistemului este conceptul de modularitate care permite o mentenanță mai simplă a acestuia, dar și o dezvoltare ulterioară mult mai rapidă și ușor de implementat.

Noul sistem este compus din: platforma educațională NI ELVIS II+ și placa de bază pe care sunt montate următoarele module, (Fig. 24):

- modulul de control al iradianței (a) – utilizat pentru obținerea unei iluminări a celulei fotovoltaice de la 100 W/m^2 până la 1000 W/m^2 (echivalentul unui soare), schimbându-se poziția suportului pentru becul de halogen se poate ajunge la o iradianță de 4 sori.
- modulul de control al temperaturii (b) – permite variația temperaturii celulei fotovoltaice de la temperatura camerei la temperatura de 80°C prin utilizarea rezistenței create pe spatele modulului suport al celulei fotovoltaice (e).
- modulul de ridicare a caracteristicii curent tensiune (c) – permite ridicarea caracteristicii menționate utilizând tehnica condensatorului în mai puțin de o secundă, fapt ce asigură eliminarea erorilor datorită modificării temperaturii celulelor fotovoltaice pe durata măsurătorilor experimentale.

- modulul de control al motorului pas cu pas (d) – asigură variația unghiului dintre direcția fluxul luminos și planul celulei fotovoltaice împreună cu motorul pas cu pas de la 0° la 90°, pasul putând fi până la o șaisprezecime din pasul nominal al motorului.
- modulul de suport al celulei fotovoltaice (e) – este poziționat pe axul motorului pas cu pas, având în componență o rezistență creată pe spatele modulului, senzorul de măsurare a temperaturii și a irradianței [41].

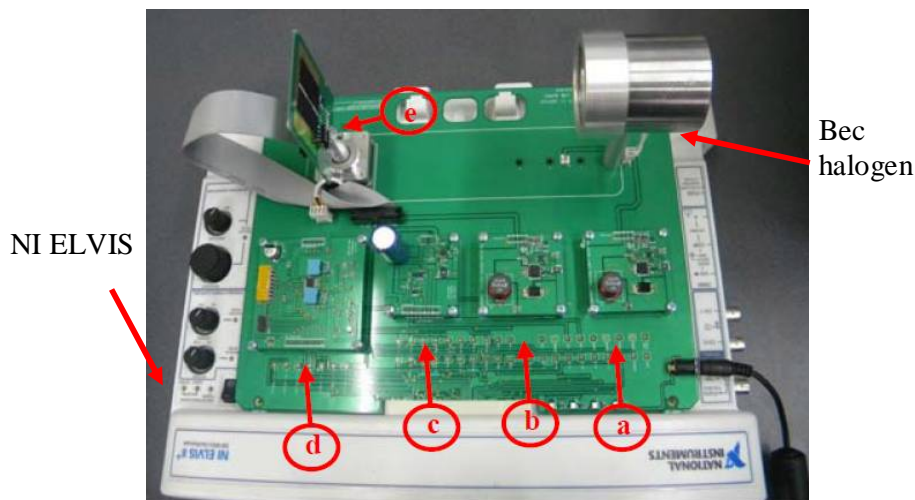


Fig. 24. SolarLab versiunea modulară [41]

Utilizarea conceptului de modularitate pentru realizarea ultimei versiuni a sistemului electronic SolarLab a permis o adaptare relativ simplă pentru utilizarea plăcii de achiziție myDAQ în locul platformei educaționale NI ELVIS. myDAQ este o placă de achiziție dezvoltată de NI, dedicată studenților, care păstrează o bună parte din facilitățile platformei NI ELVIS II+.

Implementarea sistemului mini SolarLab, (vezi Fig. 25), a fost realizată doar prin reproiectarea plăcii de bază, astfel încât să poată fi conectată la placa de achiziție myDAQ și să folosească facilitățile acesteia. Una dintre facilitățile importante permite utilizarea plăcii doar conectată la laptop, asigurându-se astfel o mobilitate ridicată. Utilizând această facilitate, sistemul mini SolarLab a fost conceput astfel încât să fie utilizat atât în laborator, cât și în mediu real.

Caracterizarea celulelor fotovoltaice poate fi realizată astfel, atât în condiții de iluminare naturală, cât și în condiții de iluminare artificială. Pentru utilizarea în condiții de iluminare naturală se utilizează doar modulul de ridicare a caracteristicii I-U, variația

iluminării și a temperaturii realizându-se datorită radiației solare. În laborator se utilizează toate modulele sistemului SolarLab, descrise mai sus, mai puțin cel pentru controlul motorului pas cu pas, deoarece pentru a se asigura mobilitatea sistemului, motorul a fost eliminat.

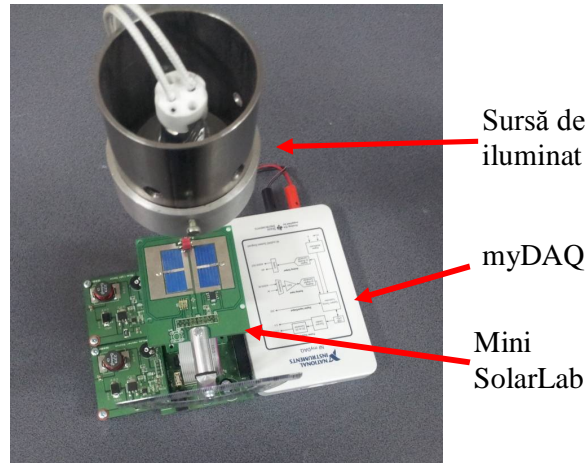


Fig. 25. Sistemul mini SolarLab [41]

Laboratoarele aferente cursurilor pot fi realizate ca laboratoare hands on – față în față, simulate – simularea echipamentelor și/sau a fenomenelor și laboratoare controlate la distanță. Sistemul SolarLab permite efectuarea lucrărilor de laborator pentru caracterizarea celulelor și minipanourilor fotovoltaice atât prin participare directă a studenților, cât și controlate de la distanță. Pentru dezvoltarea laboratoarelor simulate în domeniu s-au utilizat mediile de programare LabVIEW și NI Multisim.

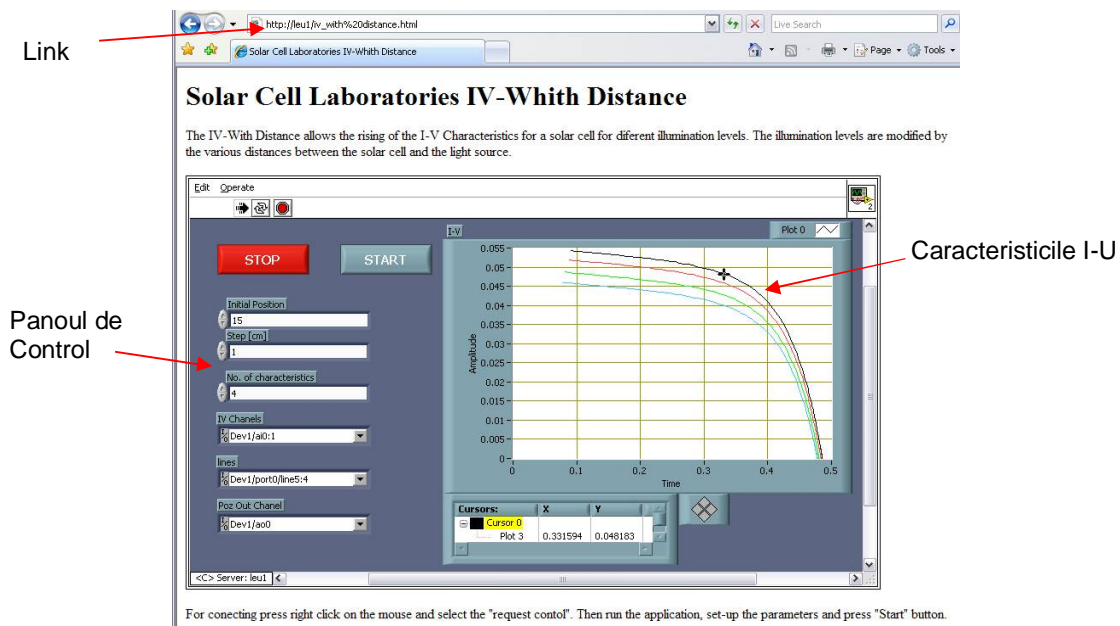


Fig. 26. Control la distanță - Interfața grafică pentru ridicarea caracteristicilor I-U [52]

Rezultatele comparației dintre cele trei tipuri de realizare a lucrărilor de laborator au fost publicate în cadrul unor conferințe și într-un capitol de carte [52-54]. Interfața grafică realizată în mediul LabVIEW utilizată pentru măsurarea caracteristicilor curent tensiune în funcție de nivelele de iluminare este prezentată în Fig. 26.

Modularitatea sistemului a permis posibilitatea de a realiza studii de caracterizare pentru alte tipuri de echipamente ce produc energie regenerabilă, cum ar fi cea eoliană – utilizând o mini turbină eoliană, un ventilator și schimbând doar modulul de ridicare a caracteristicii I-U cu un modul dedicat, (vezi Fig. 27) și cea solar termică – utilizând un mini colector solar realizat în laborator și înlocuind doar modulul de ridicare a caracteristicii I-U cu un modul dedicat, (vezi Fig. 28) [55,56].

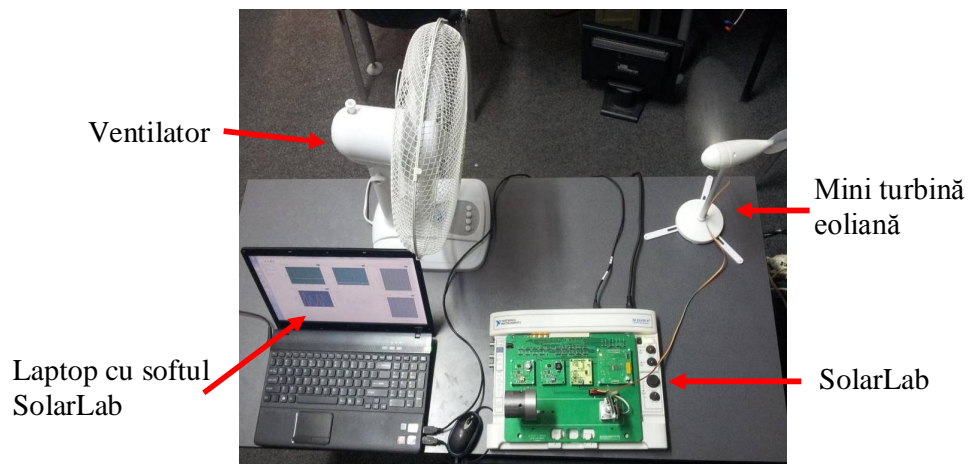


Fig. 27. RELab – studiul turbinei eoliene [41,55]

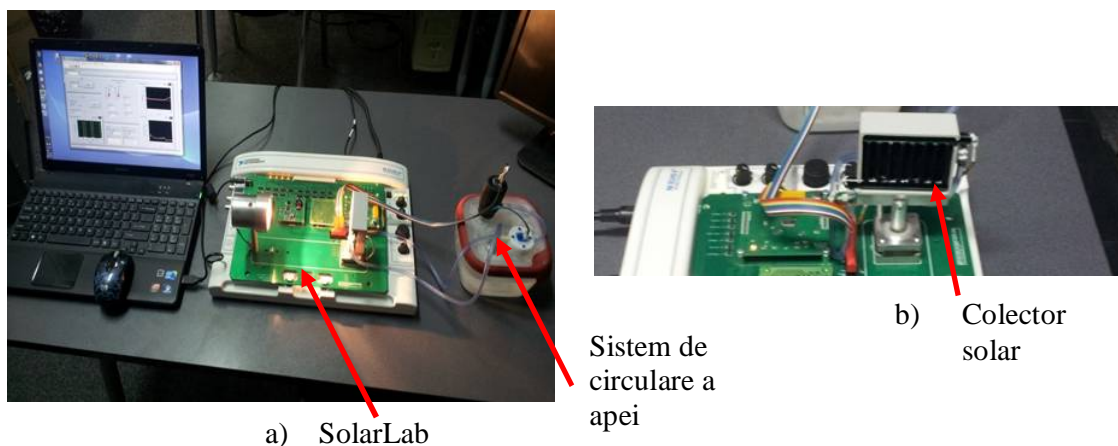


Fig. 28. RELab – studiul colectorului solar: a) vedere de ansamblu a sistemului; b) minicolectorul solar [21,55]

Noul sistem, RELab, creat permite astfel studiul pentru trei componente ale energiei regenerabile: solar fotovoltaică, solar termică și eoliană. Utilizarea plăcii myDAQ a făcut posibil ca sistemul să fie folosit și de către elevii din liceu, aplicația software dezvoltată în mediul de programare LabVIEW fiind una adaptată noilor cerințe. Plecând de la potențialul sistemului RELab, o direcție de dezvoltare este proiectarea și implementarea de noi module și dispozitive pentru studiul energiei valurilor și stocarea energiei electrice utilizând pompajul hidro, baterii, supercondensatori, etc.

Sistemul RELab permite realizarea a 15 lucrări de laborator pentru caracterizarea celulelor fotovoltaice, 6 lucrări pentru studiul turbinei eoliene și trei lucrări pentru caracterizarea colectorului solar.

Lucrările ce pot fi realizate cu RELab sunt, (vezi Fig. 29): patru cu caracter general – studiul caracteristicii I-U cu determinarea parametrilor externi, studiul parametrilor în funcție de temperatură, de nivelele de iluminare și de unghiul dintre lumina incidentă și celulă; celelalte 11 sunt dedicate determinării parametrilor interni ai celulelor fotovoltaice prin diferite metode existente în literatura de specialitate. Unele lucrări au implementate mai multe metode descrise în lucrarea [13], astfel încât se pot realiza mai multe sublucrări de laborator. De exemplu, metodele implementate pentru determinarea rezistenței serie sunt: metoda Cotfas, metoda ariei, metoda ariei generalizate, metoda punctului de putere maximă și metoda Jia și Anderson.

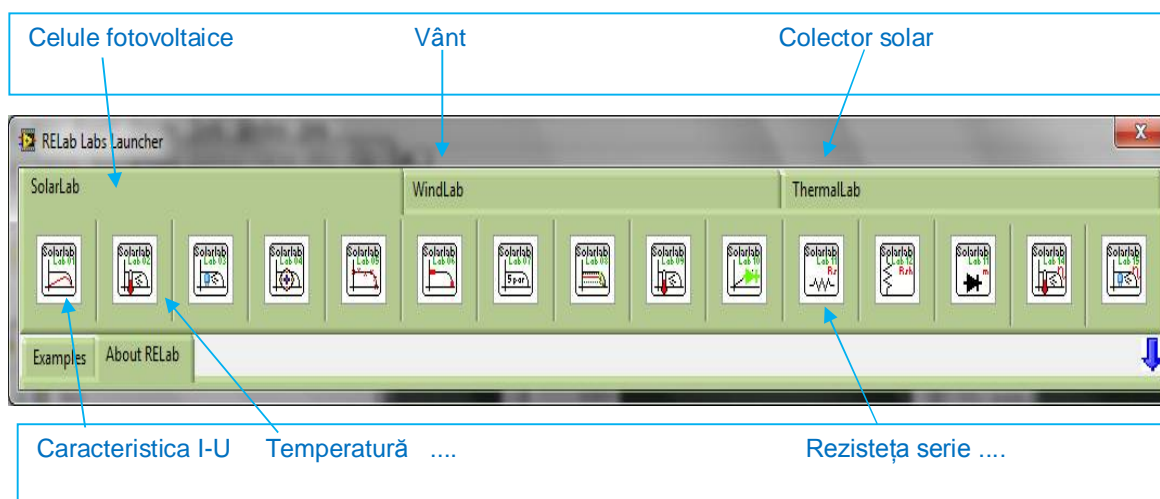
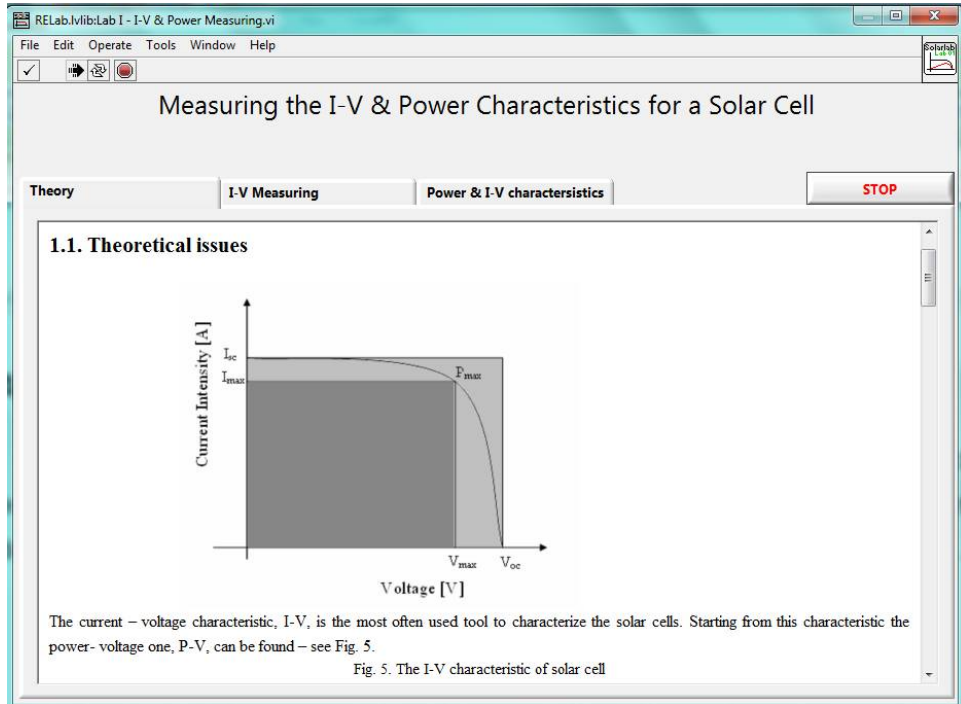


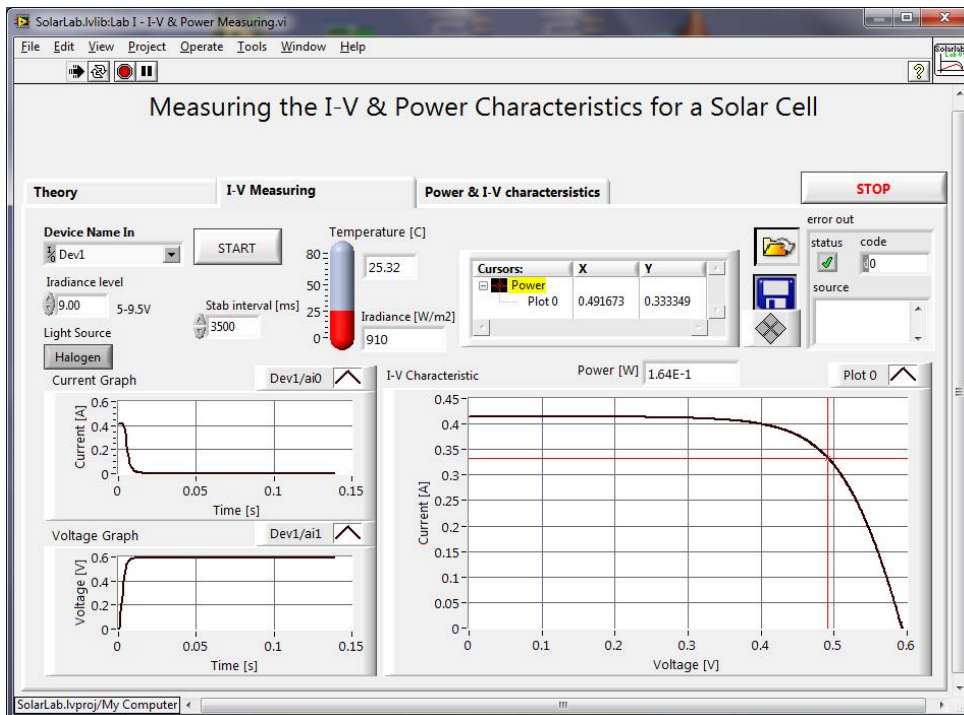
Fig. 29. Lucrările existente ale sistemului RELab. Interfața de deschidere a softului

Aplicația software pentru fiecare lucrare de laborator are, în general, aceeași structură, (vezi Fig. 30): primul Tab este dedicat teoriei – studentul are suportul teoretic al lucrării și pașii ce trebuie urmați pentru a realiza lucrarea de laborator (Fig. 30a),

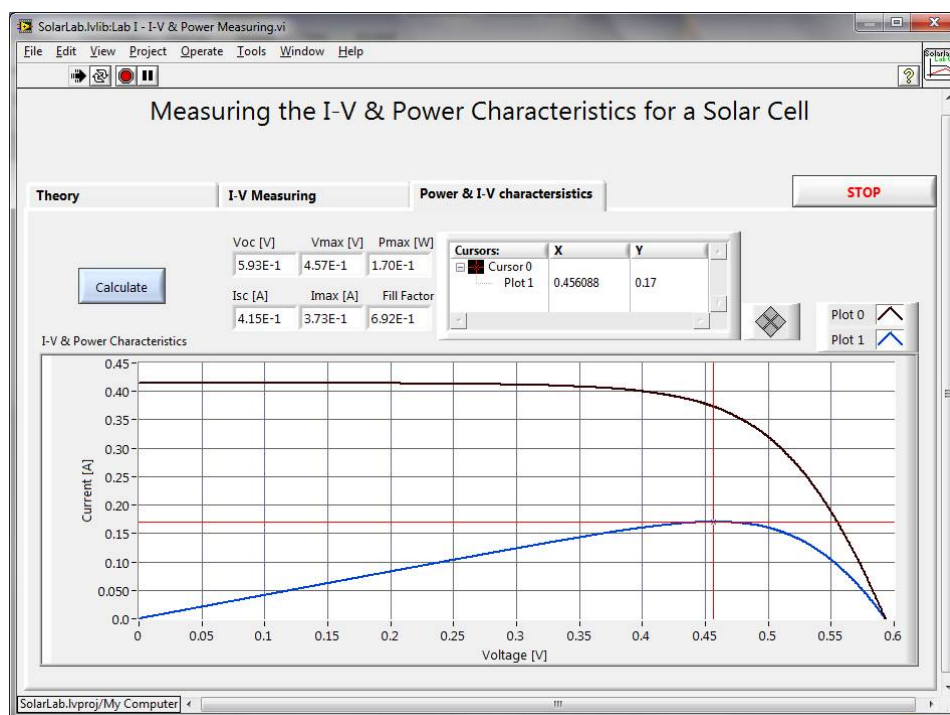
utilizând al doilea Tab se fac setările pentru lucrare și se fac măsurătorile (Fig. 30b), al treilea Tab asigură interactivitatea lucrării de laborator unde studenții realizează calculele (Fig. 30c), iar al patrulea Tab este dedicat verificării, se compară rezultatele obținute de studenți cu cele calculate de aplicația software.



a)



b)



c)

Fig. 30. Interfețe grafice ale aplicației software pentru RELab [41]

Sistemele RELab și mini RELab au fost prezentate la competiția națională organizată de firma National Instruments și la târgul de invenție EUROINVENT organizat la Iași, unde au avut un real succes, câștigând competiția națională și medalia de aur la Iași.

NI's Eastern European Team simțind potențialul acestor sisteme le-au înscris în competiția mondială. Mai jos este un citat din articolul dedicat celor două sisteme după competiție [57], iar în Fig. 31 este prezentată premiarea:

“The case study from the Transilvania University of Brasov, Romania, entitled **“Developing a Renewable Energy Laboratory Using NI ELVIS, NI LabVIEW, and NI myDAQ,”** has been selected as a finalist in the Education category as one of the best examples of graphical system design, so Petru and Daniel travelled to Austin to take part at the conference and the awards ceremony to be recognized as finalists and so find out if they have won in their category. The awards ceremony was a huge success for the brothers as **they came in as winners of the Education category** as this year’s most innovative project in the world in the field of Education. What is more, they succeeded and won two more awards, namely the **Editor's Choice Award** which is based on the votes of the editors attending NIWeek as well as **the NI Community Choice Award** which reflects the preference of the engineering audience of the NI

community who voted on their favourite projects online. With these 3 awards the Romanian project finished the contest as the most successful one this year in the world.” [57].



Fig. 31. Dr. Daniel Tudor Cofas and Dr. Petru Adrian Cofas împreună cu Dr. T. cofondatorul firmei NI la premierea de la Austin, USA

[57] *** National Instruments, Romanian University Wins 3 Prizes at the Graphical System Design Achievement Awards at NIWeek 2013

3. Aplicații

Abilitățile și competențele dobândite pe perioada realizării tezei de doctorat și după, au facilitat dezvoltarea multiplelor aplicații ce au ca punct central utilizarea celulelor fotovoltaice. În cele ce urmează voi descrie succint cele mai importante sisteme și aplicații realizate după suținerea tezei de doctorat.

3.1. Dispozitive de măsurare a radiației solare

Măsurarea radiației solare globale se realizează cu ajutorul piranometrelor care utilizează senzori termici sau fotovoltaici. Piranometrele necesită sisteme de eliminare a radiației directe, dacă se dorește măsurarea radiației solare difuze. Un astfel de dispozitiv poate fi inelul de umbrire. În cazul radiației directe se utilizează tuburi de colimare și un sistem de tip sun tracker – sistem ce urmărește soarele pe bolta cerească. Toate aceste componente necesită control și ridică costurile și așa ridicate ale acestor sisteme. În consecință este util să găsim sisteme cu performanțe apropiate sau chiar îmbunătățite, dar costuri mai reduse.

3.1.1. Albedometru

Albedo-ul este raportul dintre radiația solară reflectată de o suprafață și radiația solară incidentă pe acea suprafață. Determinarea albedo-ului este importantă în domenii precum: agricultura, construcții, forestier, fotovoltaic, și altele. Există mai multe posibilități de măsurare a acestuia: pentru suprafețe foarte mici măsurătorile se pot face în laborator, pentru suprafețe foarte mari se pot folosi sateliți sau baloane meteorologice, iar pentru suprafețe mici și medii măsurătorile se fac în condiții de iluminare naturală [58].

Pentru ultimul tip, măsurătorile se realizează cu ajutorul a două piranometre montate spate în spate, astfel încât unul măsoară radiația reflectată, iar celălalt radiația solară globală sau utilizând un singur piranometru care măsoară pe rând cele două radiații prin rotire cu 180° . Printre dezavataje putem enumera costuri ridicate, necesitatea unui suport cu dimensiuni mari, umbrirea și necesitatea unui data logger. De asemenea, în cazul albedometrului cu un singur piranometru erorile de măsură cresc considerabil, mai ales în condiții de cer variabil.

Pentru evitarea acestor dezavantaje am dezvoltat un albedometru (vezi Fig. 32 a) ce are în componență două celule fotovoltaice de siliciu monocristalin (CF) cu dimensiunile de 1 cm x 3 cm (vezi Fig. 32b).

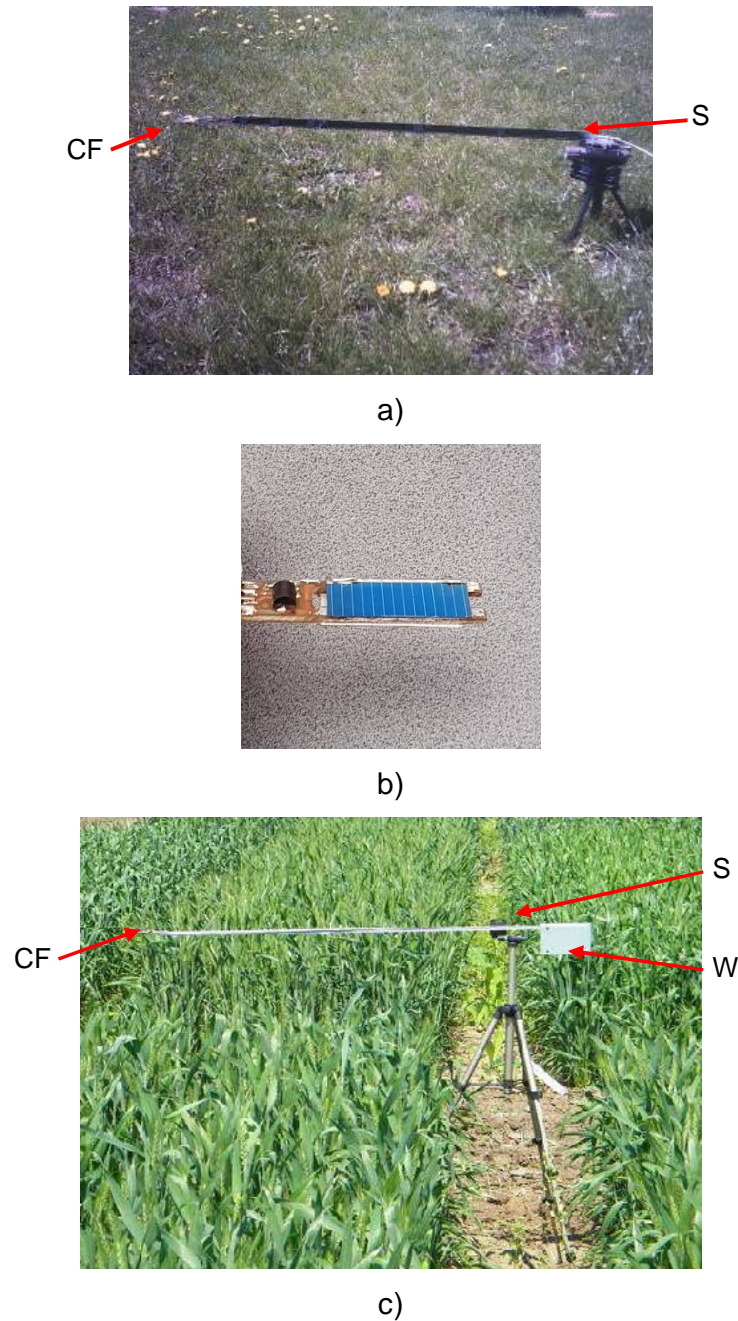


Fig. 32. Albedometre realizate: a) albedometru cu conectare la laptop; b) CF sistemul de celule fotovoltaice; c) albedometru wireless [58].

Avantajele acestui tip de piranometru sunt: costurile reduse, mobilitate ridicată și reducerea zonei umbrite la sol. Suprafața albedometrelor cu piranometre este un cerc

cu diametrul de 10 cm, în cazul noului albedometru suprafața este doar de 3 cm², ceea ce conduce la o suprafață umbră mult mai mică. Suportul (S) din Fig. 32a, pentru celule și fire, este realizat dintr-un profil U de aluminiu de 0.5 cm lățime, dimensiunile fiind reduse considerabil în raport cu cele clasice. Trepiedul utilizat oferă posibilitatea poziționării pe orizontală, având un indicator în acest sens.

În cazul primului albedometru, (Fig. 32a), măsurătorile sunt realizate utilizând o placă de achiziție NI 6036E. Curentul de scurt circuit generat de celula fotovoltaică este direct proporțional cu intensitatea radiației solare. Astfel, pentru a determina radiația solară, se face raportul dintre tensiunea măsurată pe o rezistență și valoarea acesteia. Caracteristica curent tensiune în jurul punctului corespunzător curentului de scurt circuit este cvasi paralelă cu axa tensiune. Pentru a face corecția în funcție de temperatură pentru curent, deoarece curentul de scurt circuit este influențat de variația temperaturii celulei fotovoltaice, se măsoară temperatura pe spatele celor două celule fotovoltaice cu ajutorul a doi senzori LM35. Fiecare celulă fotovoltaică este în prealabil calibrată utilizând metoda dezvoltată în teza de doctorat. De asemenea se determină coeficientul de temperatură pentru curentul de scurt circuit, pentru a determina factorul de corecție.

Experimentele realizate au arătat o bună corelare între valorile albedo-ului măsurate cu ajutorul noului albedometru și cele din literatura de specialitate pentru același tip de suprafețe (vezi Tabelul 5). Diferențele găsite se pot explica prin faptul că răspunsul spectral al celulelor de siliciu depinde de lungimea de undă.

Tabelul 5. Valorile albedo-ului pentru diferite suprafețe [58]

Suprafață	Albedou		
	Măsurat	Literatură	Eroare absolută
Iarbă verde deasă	0.23	0.215	0.015
Bitum	0.131	0.13	0.001
Pavaj	0.194	0.20	0.006
Sol umed	0.058	0.08	0.0022
Sol uscat	0.09	0.14	0.005

Deși primul albedometru creat oferea o anumită mobilitate prin conectarea directă la laptop prin placa de achiziție, pentru a spori mobilitatea și aplicabilitatea s-a dezvoltat un nou albedometru wireless (vezi Fig. 32c).

Placa de achiziție a fost înlocuită cu un modul Tag4M, care oferă: patru canale de măsurare, două necesare pentru măsurarea curenților de scurt circuit și celelalte două pentru măsurarea temperaturilor pentru cele două celule fotovoltaice, comunicație

wireless și independență energetică prin alimentarea de la o baterie. Comunicația wireless și independența energetică a albedometrului au crescut posibilitățile de utilizare.

Publicarea articolului la congresul *World Renewable Energy Congress* [58] a creat premisele colaborării cu domnul Academician Dr. Nicolai Săulescu și echipa dânsului de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Agricolă (INCD) Fundulea.

La INCD Fundulea s-au creat diferite soiuri de grâu cu scopul de a găsi printre ele pe cele cu albedo-ul mare. Culturile cu această proprietate vor fi rezistente în condiții de secetă, deoarece o reflexie mare a radiației reduce temperatura și transpirația, putând avea influențe pentru climă. Utilizând albedometrul wireless s-a măsurat albedo-ul pentru 25 de soiuri de grâu însămânțat toamna. În Fig. 33 sunt prezentate valorile albedoului măsurate pentru cele 25 de soiuri de grâu, acestea variind între 0.197 și 0.248 (au fost făcute în medie câte 5 măsurători pentru fiecare soi de grâu) [59].

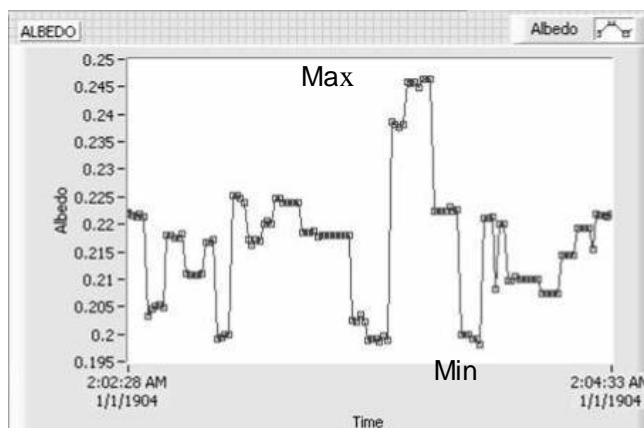


Fig. 33. Valori ale albedoului pentru diferite soiuri de grâu [59]

Măsurătorile au fost făcute în condiții de cer senin. Avantajul albedometrului wireless a fost mobilitatea ridicată, putând fi deplasat cu ușurință de la o parcelă la alta.

Un al doilea studiu s-a făcut prin comparația albedo-ului pentru aceleași soiuri de grâu înainte și după înspicare. S-a observat o schimbare semnificativă a albedoului, dar nu o corelație pentru toate soiurile. Rezultatele cercetărilor au fost publicate în două articole ISI [59,60]

Măsurătorile au fost realizate pe rând de la parcela 1 până la parcela 25, nu simultan. Acest tip de măsurătoare necesită cer senin pentru ca radiația incidentă să fie cvasiconstantă. Deoarece albedometrul comunică wireless se pot realiza rețele de

albedometre astfel încât măsurătorile să fie simultane. În aceste condiții dependența de condițiile meteo este eliminată și, în același timp, nu este necesar un operator uman.

3.1.2. Sistem de măsurare a radiației solare globale și difuze

Pentru măsurarea radiației solare globale și difuze utilizând senzori fotovoltaici a fost dezvoltat un prototip. Radiația difuză este măsurată cu acuratețe dacă mediul unde se efectuează măsurătorile este izotrop. Prototipul, (vezi Fig. 34a), și rezultatele obținute în urma testelor efectuate au fost prezentate într-un articol ISI [61].

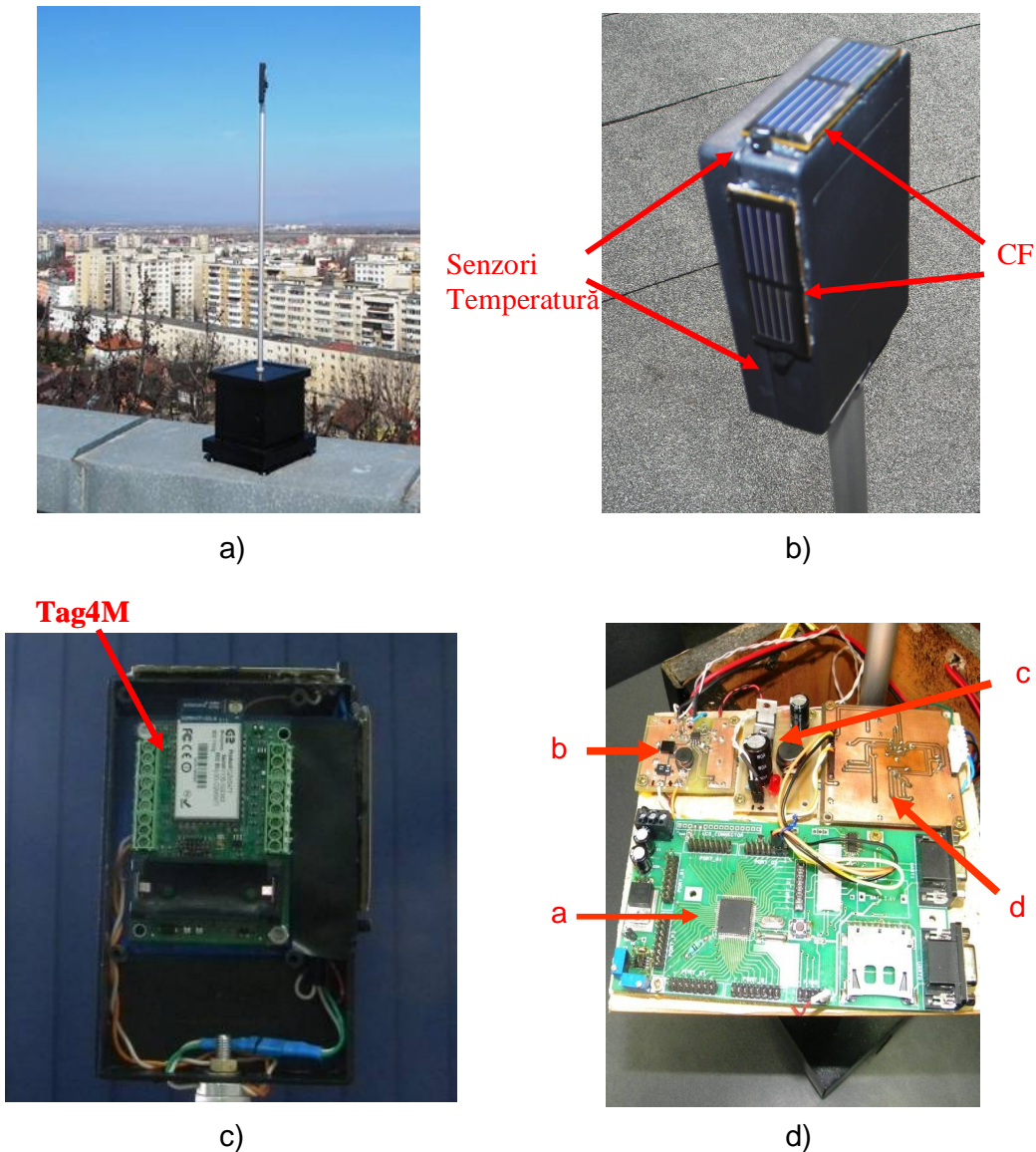


Fig. 34. Sistem de măsurare a radiației globale și difuze: a) vedere de ansamblu; b) poziționare senzori; c) Tag4M; d) sistem de control [61]

Radiația solară globală orizontală se măsoară cu o celulă fotovoltaică care a fost calibrată în prealabil și este poziționată orizontal. Pentru măsurarea cu precizie se face corecția în funcție de temperatură. Măsurarea temperaturii se face cu un senzor LM35, poziționat pe marginea celulei fotovoltaice. Măsurarea radiației difuze se realizează cu ajutorul unei celule fotovoltaice poziționată pe verticală și care, datorită sistemului de rotire, se află în permanență cu spatele spre soare. De asemenea, se face corecția de temperatură, (vezi Fig. 34b).

Pentru măsurarea curentului și transmiterea datelor s-a utilizat dispozitivul Tag4M, conceptul fiind descris în secțiunea 3.1.1, (Fig. 34c), alimentarea făcându-se de la o sursă de 3.3 V (c), (Fig. 34d), conectată la 2 baterii care asigură necesarul de energie al întregului sistem, care este astfel autonom și poate fi amplasat unde se dorește.

Rotirea sistemului cu senzori fotovoltaici s-a realizat utilizând un motor pas cu pas. Controlul acestuia s-a realizat utilizând o placă de dezvoltare cu un microcontroler ATmega 128 (a) și un driver de motor dezvoltat în laborator (d). Alimentarea s-a realizat cu ajutorul sursei (b), (Fig. 34d).

Rezultatele obținute pentru curent și componentele radiației solare pe durata unei ore în ziua de 31 martie 2011 (cer senin) sunt prezentate în Fig. 35. Se poate vedea proporționalitatea directă între curentul generat de cele două celule fotovoltaice și radiația solară globală orizontală, respectiv radiația solară difuză.

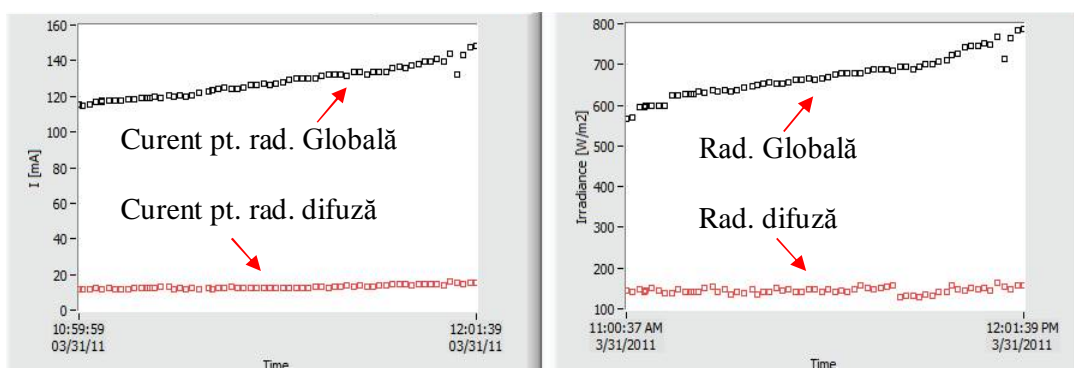


Fig. 35. Valorile curentului și radiației globale și difuze pentru ziua de 31.03.2011 [61]

În Fig. 36a este prezentată dependența dintre radiația solară globală orizontală măsurată cu sistemul dezvoltat și cu piranometru SPN1 (achiziționat într-un proiect de cercetare Idei, care măsoară radiația globală și cea difuză) și curba de fitare corespunzătoare. Pentru radiația solară difuză curbele sunt prezentate în Fig. 36b. Se

observă o foarte bună potrivire pentru radiația solară globală orizontală, coeficientul de corelație fiind 0.999, iar panta 1.004.

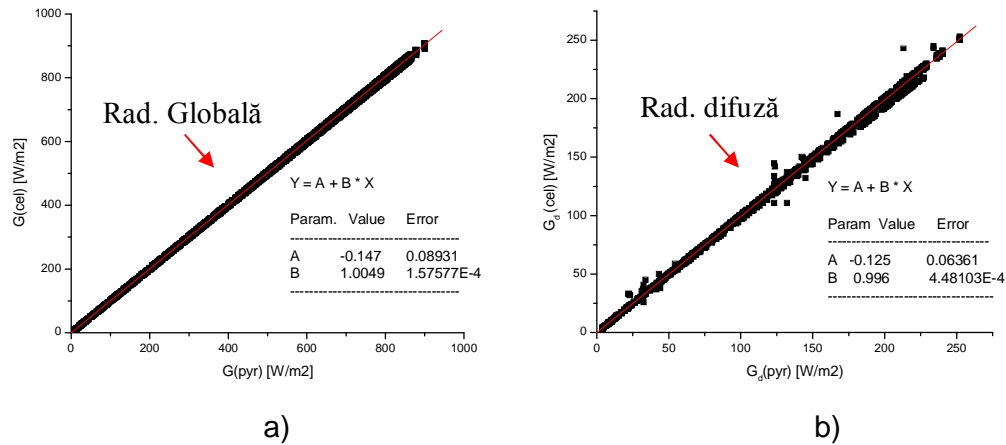


Fig. 36. Curbele de fitare: a) radiația solară globală orizontală; b) radiația difuză [61]

În cazul radiației difuze coeficientul de corelație este de 0.998, unul foarte bun, iar panta este de 0.996, ceea ce arată o bună potrivire. Analizând aceste rezultate putem concluziona că sistemul dezvoltat poate fi utilizat cu succes pentru măsurarea radiației solare pentru zile senine.

3.2. Metodă rapidă de determinare a timpului de îmbătrânire

În ultimii ani cercetătorii au dezvoltat diferite tipuri de celule fotovoltaice din dorința de a crește eficiența, de a găsi noi materiale cu cost redus, dar și pentru a simplifica procesul de fabricație și reducerea consumului de energie al acestuia.

Dacă pentru celulele de siliciu monocristalin se cunoaște timpul de viață, care este astăzi definit la 25 ani, deoarece sunt pe piață de mai mulți ani, pentru noile tipuri de celule acest timp este greu de estimat.

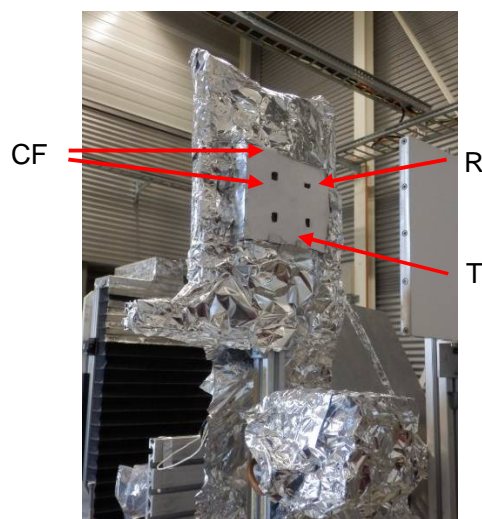
Pentru determinarea timpului de viață s-au dezvoltat mai multe metode, cum ar fi: Damp Heat test (DH), Highly Accelerated Stress Test (HAST), metode cu cicluri termice sau metoda de injectare de curent [61]. Un dezavantaj este că aceste metode nu folosesc iluminarea, adică unul dintre parametrii care influențează durata de viață a celulelor fotovoltaice. Un alt dezavantaj este durata mare a testării, numărul de ore fiind cuprins între 400 și 2000 de ore.

Ideea originală pentru reducerea numărului de ore este de a utiliza lumina concentrată. Celula fotovoltaică este supusă iluminării la nivele de concentrare joasă și medie, de la câțiva sori până la 200 sori. Un soare este echivalentul a $1000\text{W}/\text{m}^2$. Utilizând lumina concentrată, celula este iluminată și astfel, putem crește și menține temperatura celulei la valoarea dorită.

În cadrul apelului CORDIS FP7-INFRASTRUCTURES a fost lansată competiția internațională pentru accesul la Institutele de cercetare participante în programul Sfera. În anul 2014 am câștigat un prim proiect cu tema „The study of the evolution of the photovoltaic cells parameters during the ageing process using the concentrated light and the temperature”. Datorită proiectului am putut utiliza infrastructura laboratorului Solar Technologies, din Institutul Paul Scherrer, Elveția. Laboratorul deține un simulator solar care poate genera în focar 11000 de sori, folosind 10 lămpi cu descărcare în xenon.

Pentru verificarea metodei s-a creat sistemul de testare alcătuit din: suport cu răcitor (R) pentru celulele fotovoltaice (CF), sistemul de poziționare – o masă cu trei axe (T) (Fig. 37a), sistemul de măsură bazat pe platforma NI cRio. Pentru măsurarea caracteristicilor curent tensiune s-a dezvoltat un sistem bazat pe tehnica condensatorului, cu 4 canale ce măsoară simultan cele patru celule fotovoltaice. Temperatura fiecărei celule s-a măsurat cu ajutorul unui termocuplu.

Poziționarea celor patru celule, două de siliciu monocristalin și două cu triplă joncțiune InGaP/InGaAs/Ge, s-a realizat astfel încât celulele să fie iluminate la același nivel de iluminare, 190 de sori, ales după o serie de teste preliminare. Distribuția nivelelor de iluminare este prezentată în Fig. 37b.



a)

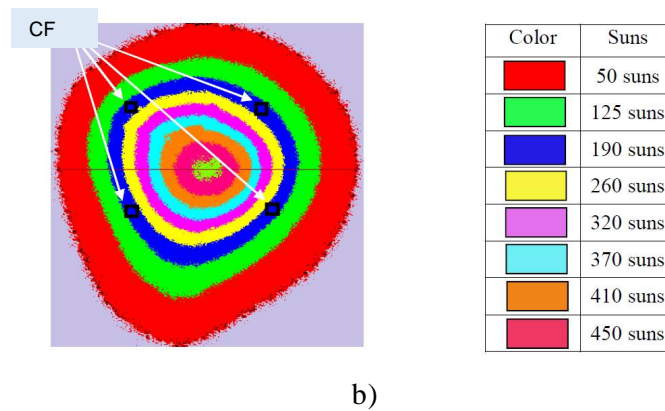


Fig. 37. Distribuția celulelor fotovoltaice pentru teste în lumină concentrată: a) suportul cu răcitor; b) nivelele de iluminare [62]

Se consideră că panourile fotovoltaice nu mai sunt viabile dacă puterea maximă generată a scăzut cu 20% față de cea inițială, iar pentru celulele fotovoltaice Núñez et al. [63] au propus 10%.

Sistemul de măsurare oferă în timp real puterea maximă generată de celulele fotovoltaice aflate în testare, astfel încât putem constata ușor după câte ore celulele fotovoltaice au atins pragul mai sus amintit. Celulele fotovoltaice au fost supuse iluminării în medie 8 ore pe zi în continuu după care nu mai erau iluminate 16 ore, ciclurile repetându-se.

Rezultatele obținute pentru puterea maximă a celulei de siliciu monocristalin sunt redate în graficele din Fig. 38.

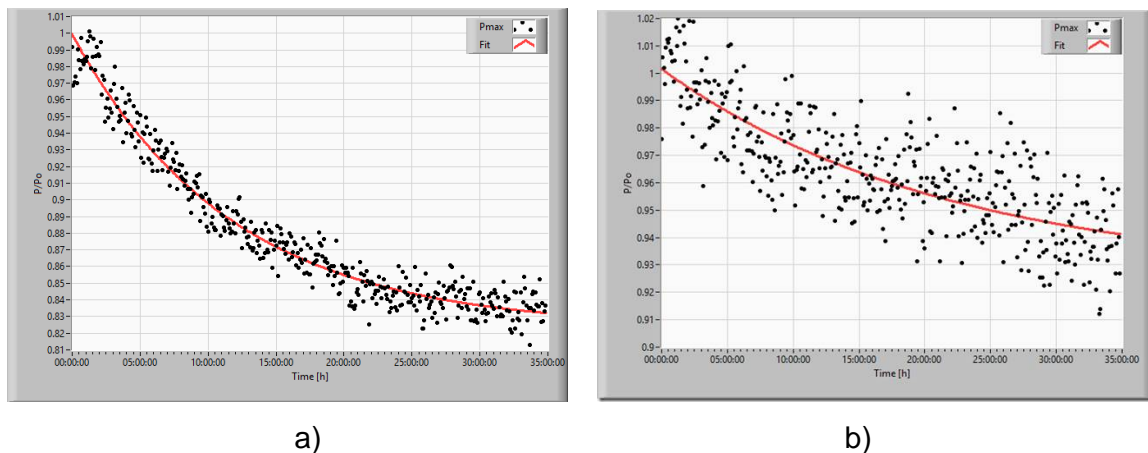


Fig. 38. Variația puterii maxime normalizate a celulelor fotovoltaice în timp: a) siliciu monocristalin fără sarcină; b) siliciu monocristalin cu sarcină [62]

Se observă că pentru celula de siliciu monocristalin fără sarcină puterea maximă normalizată scade foarte repede, depășind limita după aproximativ 10 ore (vezi Fig. 38a), iar după 35 de ore cumulate s-a ajuns la pragul pentru panourile fotovoltaice. Pentru celula de siliciu monocristalin cu sarcină se observă o scădere mult mai lentă, astfel după 35 de ore scăderea este doar de 6% (vezi Fig. 38b).

În cazul celulelor cu triplă joncțiune de InGaP/InGaAs/Ge puterea maximă normalizată după 35 de ore scade doar cu 1.5%. Acest rezultat ne arată o viabilitate foarte ridicată pentru acest tip de celule fotovoltaice.

Pentru a valida rezultatele au fost realizate și comparații între parametri de curent continuu, respectiv cei de curent alternativ ai celulelor fotovoltaice obținuți înainte de începerea procesului rapid de îmbătrânire și după. În Tabelul 6 sunt prezentate rezultatele obținute prin spectroscopie de impedanță pentru celula de siliciu monocristalin îmbătrânită fără sarcină.

Tabelul 6. Valorile parametrilor ac pentru mSi

Celula fotovoltaică	Test îmbătrânire	C [nF]	R _s [Ω]	R _p [Ω]
mSi fără sarcină	înainte	644.3±3.5	0.23±0.01	49.67±0.2
	după	432.4±2.5	0.76±0.01	24,23±0.16

Se observă o corelare foarte bună cu rezultatele obținute pentru puterea maximă, astfel apare o creștere semnificativă a rezistenței serie și o descreștere a rezistenței șunt și a capacității.

Având în vedere rezultatele obținute a fost depusă o cerere de brevet la OSIM intitulată: Metodă și dispozitiv de testare accelerată a timpului de îmbătrânire a celulelor fotovoltaice – ARCL, CBI A 00557 31.07.2015.

3.3. Lampă solară inteligentă

În urma colaborării cu firma Steinel Germania și sucursala sa din România a fost dezvoltată o lampă solară inteligentă cu multiple utilizări: lampă de grădină, de număr pentru casă și terase. Dezvoltarea s-a realizat în cadrul proiectului derulat pe perioada 2011-2013 cu titlul „Sistem inteligent pentru managementul energiei oferite de panourile

solare la alimentarea lămpilor cu senzori de infraroșu”. Echipa din care am făcut parte a dezvoltat prototipul lămpii și testarea lui în diferite condiții de funcționare.

Lămpile de grădină cu celule fotovoltaice sau mini panouri fotovoltaice existente la acea perioadă aveau o construcție simplă: celula fotovoltaică sau mini panoul fotovoltaic, circuitul de încărcare și control pentru deschiderea sau oprirea LED-ului, o baterie reîncărcabilă de capacitate mică și cu un design minimalist, toate acestea pentru a avea un cost extrem de redus. Lampa dezvoltată de Steinel ca rezultat al cercetărilor din proiect este un produs de top, (vezi Fig. 39), dotat cu senzor de mișcare, trei LED-uri de putere ce iluminează la intensitate mică de veghe (curent mic) și pentru durate cuprinse între 20-30 s la intensitate ridicată (curent mare), management energetic și design futurist.



Fig. 39. Lampă solară produsă de Steinel [64]

Există două tipuri de sisteme majore care generează energie electrică convertită din energie solară folosind panourile fotovoltaice și anume sistemele autonome și sistemele conectate la rețeaua de energie electrică. Pentru sistemele conectate la rețeaua electrică, scopul este maximizarea energiei produse într-un an, în timp ce pentru sistemele autonome proiectarea trebuie să asigure maximum de energie electrică pentru perioadele critice din an.

Lampa solară funcționează ca un sistem autonom care trebuie să-și asigure energia de funcționare pe durata întregului an fără întreruperi. Perioada critică pentru astfel de sisteme este din luna octombrie până în luna martie, dar cu probleme mai mari în decembrie și ianuarie. Cauzele sunt ușor de identificat: nopți lungi de peste 16 ore când LED-urile trebuie să funcționeze, perioade scurte cu soare când bateriile se pot încărca, temperaturi coborâte, în general negative noaptea și condiții slabe de iluminare, de asemenea putând exista un număr mare de zile fără soare.

Folosind valorile unghiului optim de înclinare pe an și pe fiecare lună în parte, obținute prin utilizarea softului Photovoltaic Geographical Information System - PVGIS [65] s-a decis ca panoul solar să fie înclinat la unghiul optim mediu de 55° pentru perioada cea mai critică (vezi Fig. 40).

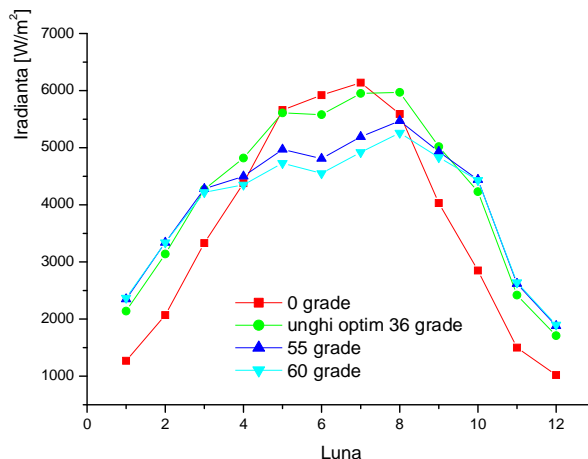


Fig. 40. Iradianța în funcție de unghiul de înclinare

Avantajele oferite de a poziționa panoul înclinat, nu orizontal sunt multiple: panoul generează o cantitate mai mare de energie în perioada critică deoarece fluxul luminos cade aproape perpendicular pe panou și datorită temperaturilor ambientale mici, efectul de încălzire fiind unul relativ mic; procesul de curățire naturală este ajutat de înclinare atât pentru praf și dejecții ale păsărilor, cât și pentru topirea sau înlăturarea zăpezii de pe suprafața panoului; o creștere a energiei electrice produse de lumina reflectată de sol mai ales iarna, când există zăpadă. Dacă panoul este acoperit cu zăpadă (vezi Fig. 41) el generează sub 30% din puterea nominală.



Fig. 41. Panou fotovoltaic acoperit cu zăpadă [66]

Au fost testate mai multe tipuri de panouri fotovoltaice pentru a alege cea mai bună soluție, având în vedere constrângerile date de necesarul de energie: consumul de energie electrică al senzorilor și sistemelor de control și eficiența sistemelor electronice utilizate. Astfel au fost testate trei tipuri de panouri fotovoltaice: de siliciu monocristalin, de siliciu policristalin și de siliciu amorf.

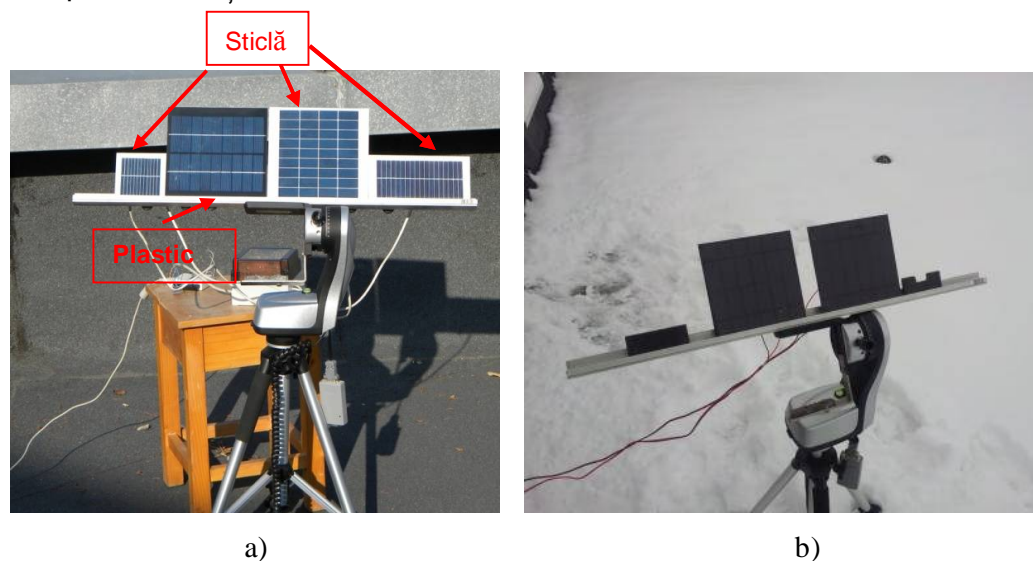


Fig. 42. Sistemul de testare a panourilor fotovoltaice: patru panouri fotovoltaice vara;
b) două panouri iarna

Alegerea a fost făcută și din rațiuni administrative, cost, existența pe piață pentru a putea fi ușor folosite, etc. Panourile de siliciu mono și policristalin au fost testate și în funcție de materialul folosit pentru încapsulare, plastic sau sticlă (vezi Fig. 43).

Pentru o integrare simplă a panoului fotovoltaic în designul ales pentru lampa solară s-a testat posibilitatea utilizării unui strat de plastic suplimentar care să fie transparent sau difuzor. În urma testelor a rezultat că pentru cel transparent rezultatele sunt mai bune, dar pierderile pentru valori mici ale radiației solare sunt mari și pentru cel transparent și nu se justifică această abordare (vezi Fig. 43).

Analiza datelor adunate pe parcursul testelor a arătat că în cazul acesta, când suprafața este un parametru important, panourile de siliciu monocristalin sunt cele mai potrivite. Testele au relevat că în toate situațiile analizate puterea maximă generată de panourile fotovoltaice de siliciu monocristalin este aproape de două ori mai mare decât în cazul celor de siliciu amorf. Un candidat este și panoul fotovoltaic de siliciu policristalin, eficiența acestuia fiind doar cu 1-2% mai mică decât cea a panoului de siliciu monocristalin.

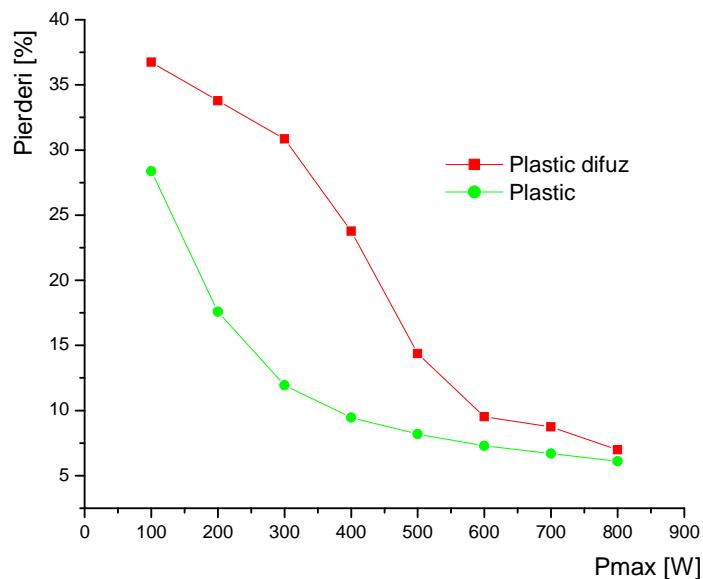


Fig. 43. Pierderi în putere maximă

În urma testelor făcute pe prototipul lămpii solare inteligente s-a constatat că aceasta funcționează peste două săptămâni în condiții critice, fără soare aproape deloc.

3.4. Utilizarea inteligentă a panourilor fotovoltaice

Montarea panourilor fotovoltaice diminuează suprafețe de teren care pot fi folosite pentru agricultură sau alte scopuri. Pentru a reduce acest dezavantaj există cercetări pentru cultivarea plantelor sub panourile fotovoltaice. O altă posibilitate, deja utilizată pe scară largă este montarea lor pe acoperișurile clădirilor. Problema care apare este dacă suprafața acestora este suficientă. În caz contrar o alternativă este montarea panourilor fotovoltaice pe pereții verticali dacă structura clădirilor permite acest lucru.

O soluție prezentată de Cotfas et al. în International Journal of Photoenergy [67] este creșterea cantității de energie produsă de același panou, reducându-se astfel numărul necesar de panouri fotovoltaice, utilizând o soluție simplă.

Pentru creșterea puterii generate de panourile fotovoltaice se poate folosi radiația reflectată de suprafețele pe care acestea sunt montate. Ideea este ca acoperișurile plane, nu înclinate, pe care sunt montate panourile fotovoltaice să fie acoperite cu un strat de hidroizolație de culoare albă. Astfel, ca și în cazul lămpii solare inteligente, pe panourile fotovoltaice va ajunge mai multă radiație reflectată, care în cazul suprafețelor albe poate ajunge până la peste 90%.

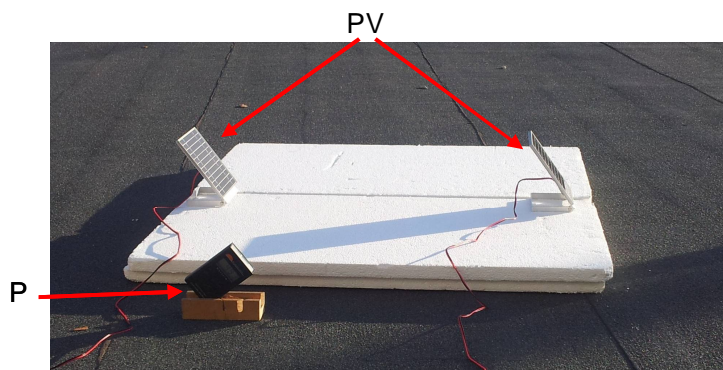


Fig. 44. Dispunerea panourilor fotovoltaice [67]

Experimentul a fost realizat pe acoperișul corpului C al Universității Transilvania din Brașov, folosind două panouri fotovoltaice de siliciu monocristalin (vezi Fig. 44). Pentru a crea condițiile cerute, unul dintre panouri este poziționat pe panouri de polistiren expandat de culoare albă, la margine, pentru a avea în față suprafața albă reflectantă, iar cel de al doilea este montat la cealaltă margine astfel încât să fie evitate reflexiile de pe suprafața albă a polistirenului. Distanța s-a ales astfel încât primul panou fotovoltaic să nu-l umbrească pe al doilea. Pentru a evita diferențele datorate altor cauze, panourile au fost alese să fie „gemene”, să aibă caracteristici cvasiidentice.

Valorile albedoului pentru cele două suprafețe au fost măsurate în prealabil și au fost găsite valorile: 0.131 pentru membrana bituminoasă și 0.83 pentru polistirenul expandat utilizat în experiment.

Pentru măsurarea radiației solare s-a folosit un piranometru poziționat sub același unghi de înclinare cu cel al panourilor fotovoltaice. Măsurătorile caracteristicilor curent tensiune au fost făcute cvasisimultan, utilizând placa NI 6036 și circuitul electronic de măsurare dezvoltat, iar pentru măsurarea temperaturii panourilor s-au folosit două termocuple.

Măsurătorile au fost realizate atât în zile senine, cât și zile înorate. Unghiul de înclinare a panourilor fotovoltaice a fost ales cel optim pentru perioada în care măsurătorile au fost făcute.

Softul de achiziție de date și prelucrarea lor a fost realizat în limbajul de programare grafică LabVIEW. Caracteristicile putere tensiune pentru cele două panouri fotovoltaice măsurate într-o zi senină din luna mai, la valoarea radiației solare globale de 990 W/m^2 pentru unghiul de înclinare de 16° sunt prezentate în Fig. 45. Se observă un câștig în putere pentru panoul fotovoltaic pe care se reflectă radiația solară.

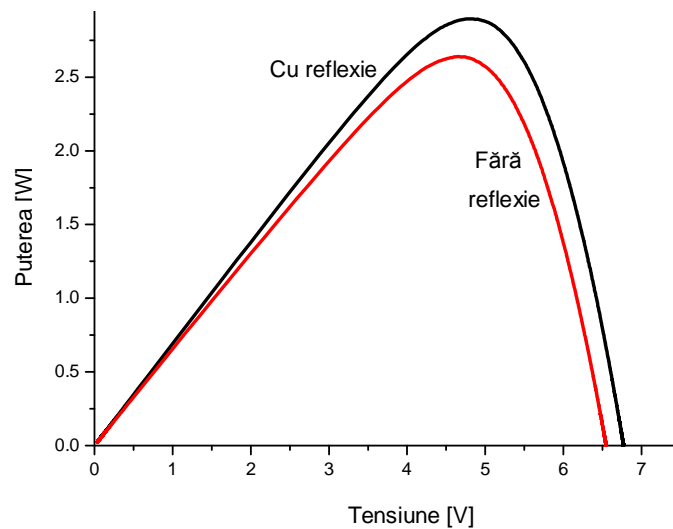


Fig. 45. Caracteristicile putere tensiune pentru panourile fotovoltaice testate [67]

Temperatura panoului fotovoltaic pe care se reflectă radiația solară este cu 5°C mai mare decât temperatura celuilalt panou. Creșterea temperaturii unei celule fotovoltaice de siliciu monocristalin cu un grad Celsius duce la o scădere în jur de 2.2 mV pentru tensiunea de circuit deschis și o scădere de aproximativ 0.4% pentru puterea maximă generată de celula fotovoltaică. Puterea maximă generată de primul panou este de 2.94 W cu 0.38 W mai mult decât cea generată de cel de al doilea panou fotovoltaic, ceea ce reprezintă un câștig de aproape 15%.

Pentru a avea o imagine de ansamblu, puterea maximă generată de cele două panouri fotovoltaice pe întreaga zi a fost reprezentată în funcție de iradianță (vezi Fig. 46). Se observă un câștig și pentru valori mici ale iradianței, valori valabile pentru perioade de la răsăritul și apusul soarelui.

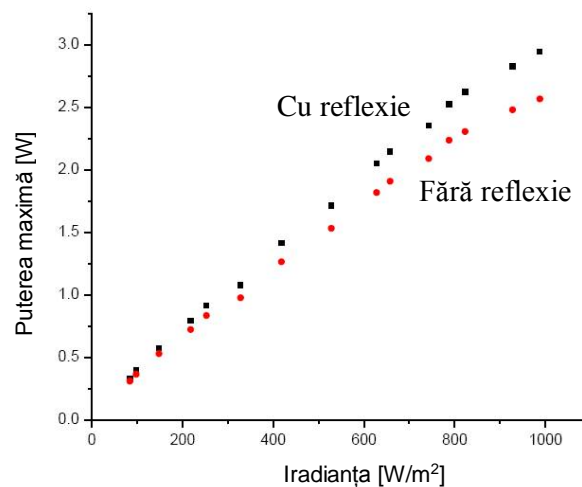


Fig. 46. Puterea maximă în funcție de iradianță [67]

În Fig. 47 este prezentat câștigul în procente pentru primul panou fotovoltaic în funcție de iradianță, pentru toate zilele luate în considerare. Se observă un câștig aproximativ între 8% și 15%.

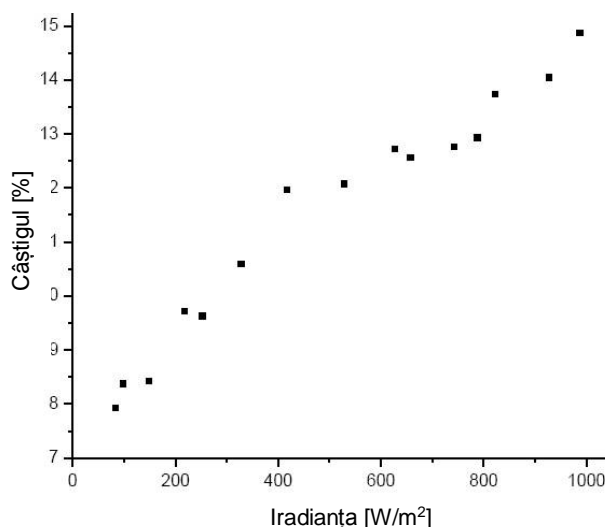


Fig. 47. Câștigul în procente vs iradianță [67]

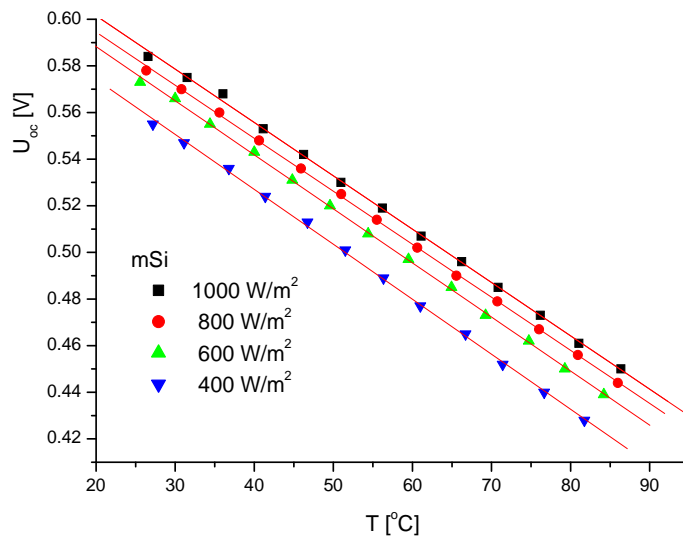
O parte din câștig este anulată de creșterea de temperatură pentru primul panou. Utilizând metode de răcire a panoului fotovoltaic, prin convecție naturală de exemplu, câștigul va depăși valoarea de 15%.

Un alt avantaj al utilizării acestei metode este acela că tavanul locuințelor nu se va mai încălzi la fel de mult ca cel acoperit cu membrană bituminoasă datorită reflexiei. Aceasta conduce la o temperatură mai scăzută în locuință și deci la economie de energie prin reducerea duratei de folosire a aparatelor de aer condiționat. De asemenea o temperatură mai mică a acoperișului înseamnă o temperatură mai mică și pentru panourile fotovoltaice.

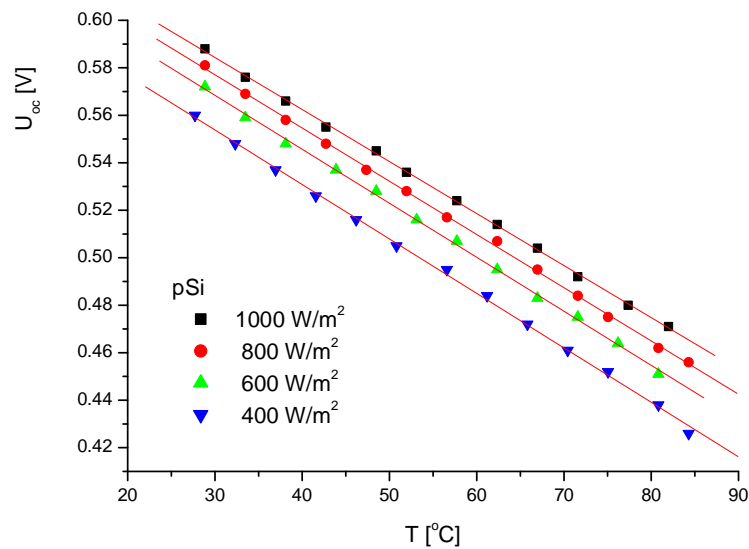
Influența temperaturii asupra eficienței celulelor fotovoltaice se regăsește în influența temperaturii pentru parametrii acestora. În general influența se determină pentru condiții standard de testare, dar celulele și panourile sunt folosite în condiții de iluminare naturală. Este foarte important să determinăm coeficienții de temperatură, mai ales dacă dorim să estimăm cu precizie energia generată de un sistem fotovoltaic în condiții de lucru reale.

În articolul din International Journal of Photoenergy [68] am realizat un studiu cu privire la influența temperaturii asupra parametrilor importanți pentru patru tipuri de celule fotovoltaice și anume: siliciu monocristalin, siliciu policristalin, siliciu amorf și

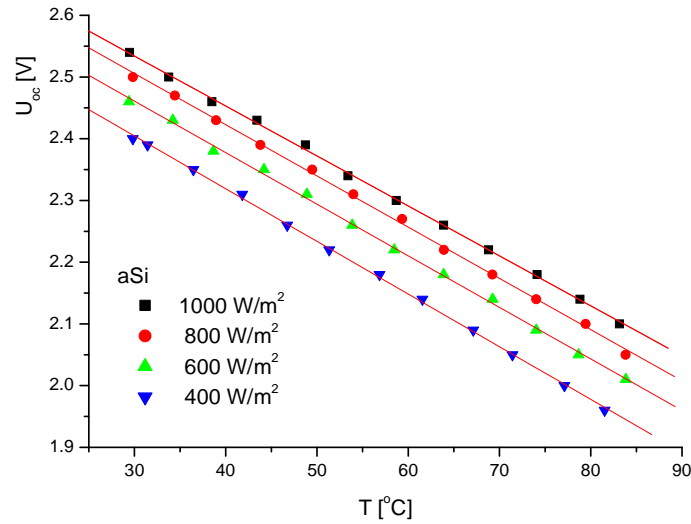
celulă cu triplă joncțiune InGaP/InGaAs/Ge. Celulele fotovoltaice au fost testate sub iluminare la diferite valori ale irradiației: 400W/m^2 , 600W/m^2 , 800W/m^2 , 1000W/m^2 , iar temperatura a variat de la 25°C la 85°C . Parametrii considerați sunt tensiunea de circuit deschis, curentul de scurt circuit, puterea maximă, factorul de umplere, curentul invers de saturație, rezistența serie și rezistența șunt. Variația tensiunii de circuit deschis în funcție de temperatură și iradiație pentru cele patru tipuri de celule este prezentată în Fig. 48.



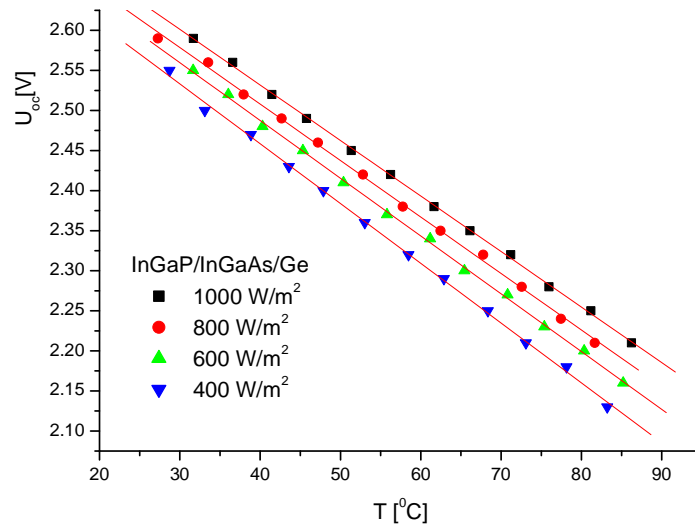
a)



b)



c)



d)

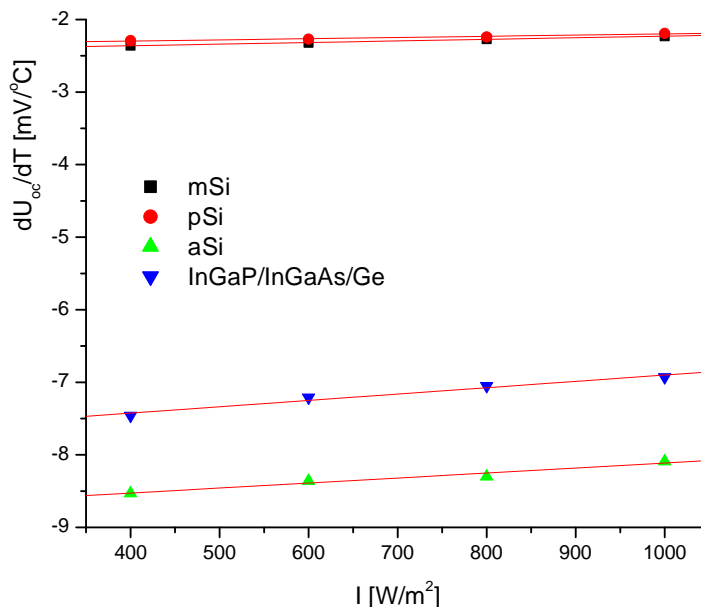
Fig. 48. Dependența de temperatură și iradianță a tensiunii de circuit deschis pentru diferite tipuri de celule: a) mSi; b) pSi; c) aSi; d) InGaP/InGaAs/Ge [68]

Analizând graficele obținute observăm o dependență liniară în toate cazurile considerate. În Tabelul 7 sunt prezentate valorile coeficientului de temperatură al tensiunii de circuit deschis pentru cele patru tipuri de celule fotovoltaice analizate în funcție de nivelele de iluminare.

Tabelul 7. Variația coeficientului de temperatură pentru U_{cd} [68]

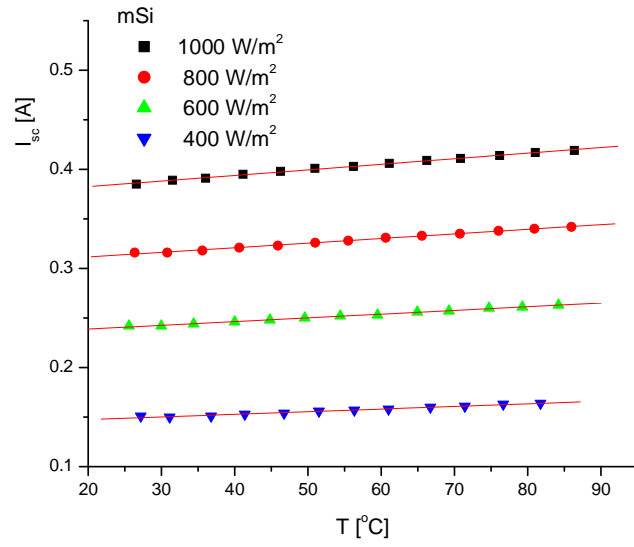
Tip \ Coef.	Iradianță			
	400W/m ²	600W/m ²	800W/m ²	1000W/m ²
mSi	-2.36	-2.32	-2.27	-2.24
pSi	-2.29	-2.27	-2.24	-2.19
aSi	-8.53	-8.36	-8.3	-8.09
InGaP/InGaAs/Ge	-7.46	-7.21	-7.05	-6.93

Valorile obținute sunt în concordanță cu rezultatele prezentate în literatura de specialitate. Se observă o dependență a coeficientului de temperatură a tensiunii de circuit deschis în funcție de iradianță, iar dependența este una liniară, așa cum reiese din graficul prezentat în Fig. 49.

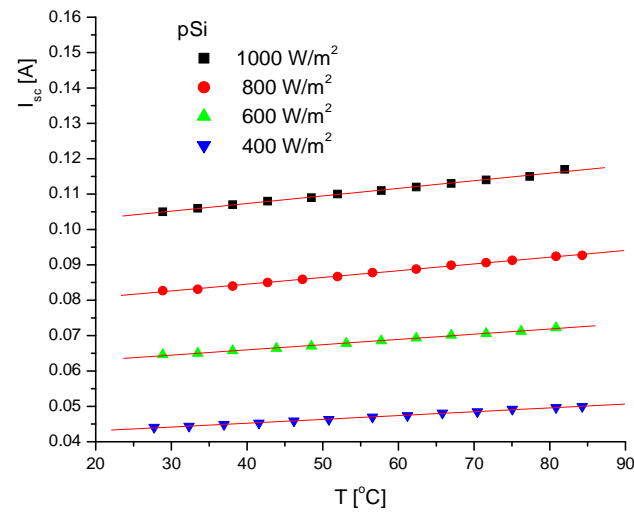
Fig. 49. Dependența coeficientului de temperatură pentru U_{cd} în funcție de iradianță [68]

Dacă creșterea temperaturii duce la scăderea tensiunii de circuit deschis, curentul de scurt circuit crește, dar mult mai puțin, aproape cu un ordin de mărime. Dependența curentului de scurt circuit pentru cele patru tipuri de celule fotovoltaice este prezentată în Fig. 50.

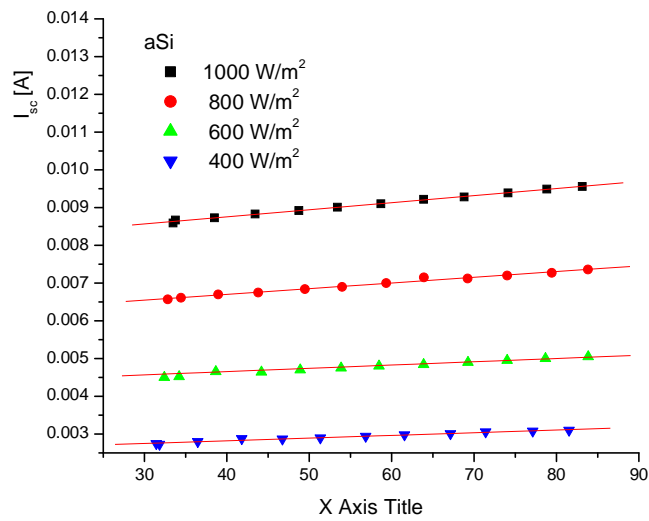
Se observă atât pentru tensiunea de circuit deschis, cât și pentru curentul de scurt circuit o îmbunătățire a coeficienților de temperatură odată cu creșterea iradianței.



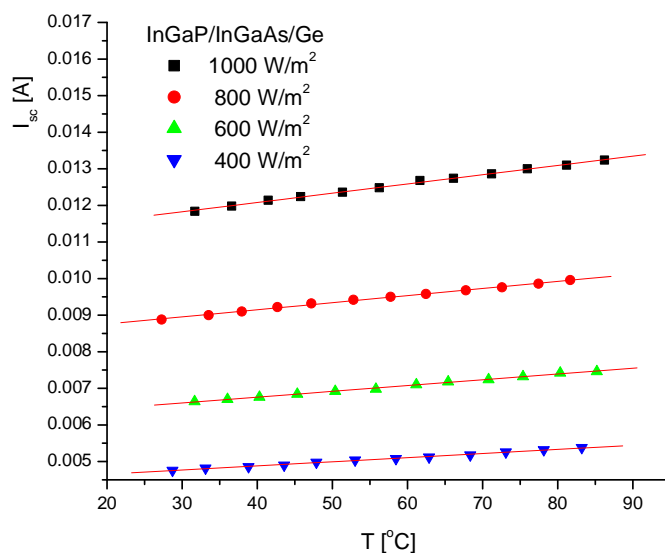
a)



b)



c)



d)

Fig. 50. Dependența de temperatură și iradianță a curentului de scurt circuit pentru diferite tipuri de celule: a) mSi; b) pSi; c) aSi; d) InGaP/InGaAs/Ge

Pentru curentul de scurt circuit se observă o creștere mai accentuată, valoarea coeficientului de temperatură se dublează atunci când iradianța crește de la valoarea de 400W/m² la valoarea de 1000W/m² (vezi Tabelul 8).

Tabelul 8. Variația coeficientului de temperatură pentru I_{sc}

Tip	Coef.	Iradianță			
		400W/m ²	600W/m ²	800W/m ²	1000W/m ²
mSi		0.265	0.375	0.465	0.537
pSi		0.108	0.147	0.191	0.215
aSi		0.00727	0.0106	0.0151	0.0187
InGaP/InGaAs/Ge		0.0125	0.0158	0.0194	0.0253

Creșterea curentului odată cu creșterea temperaturii nu compensează scăderea în tensiune și astfel creșterea temperaturii duce la scăderea puterii maxime pentru toate cele patru celule fotovoltaice analizate (vezi Fig. 51).

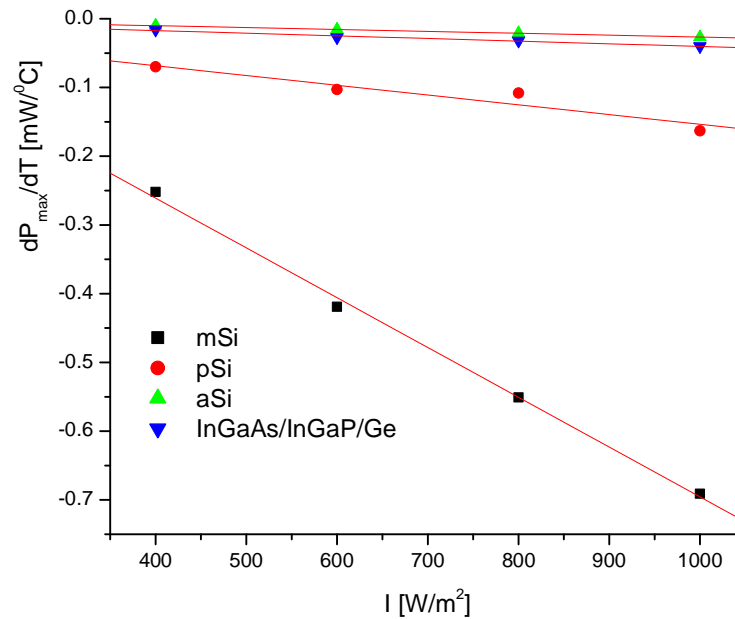


Fig. 51. Variația coeficientului de temperatură a puterii maxime în funcție de iradianță [68]

Coeficientul de temperatură al puterii maxime variază cu iradianța cel mai mult în cazul celulei fotovoltaice de siliciu monocristalin, de 2.75 ori, și cel mai puțin pentru celula fotovoltaică de siliciu policristalin, de 2.3 ori, Tabelul 9, valori care sunt situate de o parte și alta a valorii de variație a iradianței, 2.5 ori. Pentru celula de siliciu amorf avem o variație de 2.65 ori, iar pentru celula fotovoltaică multijoncțiune variația este de 2.5 ori.

Tabelul 9. Variația coeficientului de temperatură pentru P_{max} [68]

Tip	Coef.	Iradianță			
		400W/m ²	600W/m ²	800W/m ²	1000W/m ²
mSi		-0.251	-0.419	-0.551	-0.691
pSi		-0.07	-0.103	-0.128	-0.163
aSi		-0.0101	-0.0158	-0.0208	-0.0268
InGaP/InGaAs/Ge		-0.016	-0.027	-0.032	-0.040

Considerând nivelul de iluminare din condițiile standard de testare, 1000 W/m², găsim următoarele valori pentru descreșterea puterii maxime a celor patru celule fotovoltaice testate, la creșterea cu un grad a temperaturii (vezi Tabelul 10).

Tabelul 10. Procentul de descreștere a puterii maxime [68]

Tip	mSi	pSi	aSi	InGaP/InGaAs/Ge
Procente	-0.47%	-0.38%	-0.18%	-0.14%

Influența temperaturii asupra puterii maxime generate este mai mică pentru celula fotovoltaică multijoncțiune și pentru celula de siliciu amorf. Coeficientul de temperatură al puterii maxime pentru celula fotovoltaică multijoncțiune trebuie să fie cât mai mic deoarece este fabricată pentru și în general utilizată în lumină concentrată (până la 1000 de sori). Celula fotovoltaică de siliciu amorf are coeficientul de temperatură mic ceea ce o face utilizabilă la temperaturi mai mari, dar din păcate eficiența acestui tip de celulă este mică, în caz real între 5-10%.

Variația factorului de umplere în funcție de temperatură este de asemenea una liniară (vezi Fig. 52).

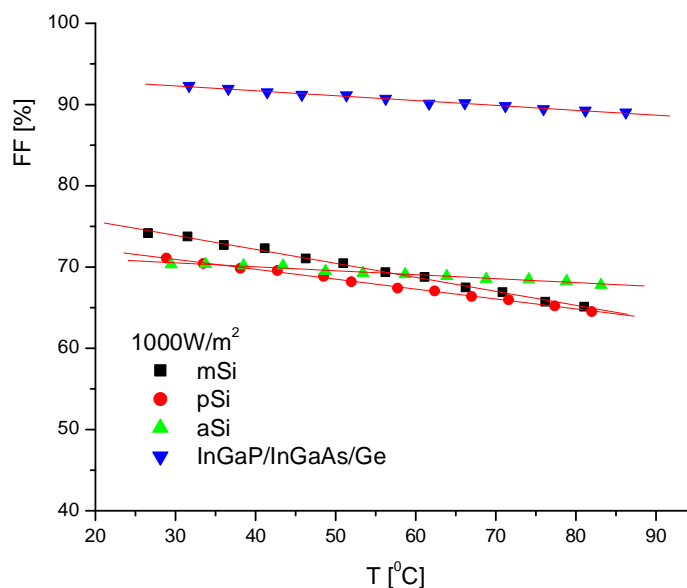


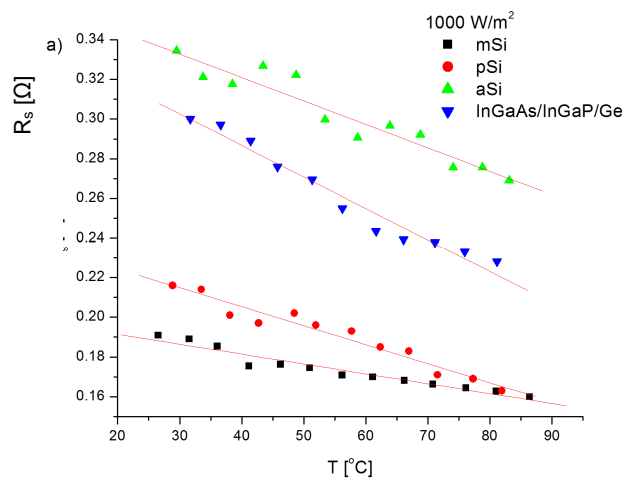
Fig. 52. Variația FF pentru cele patru tipuri de celule fotovoltaice în funcție de temperatură [68]

Variația coeficientului de temperatură a factorului de umplere în funcție de iradianță este prezentată în Tabelul 11.

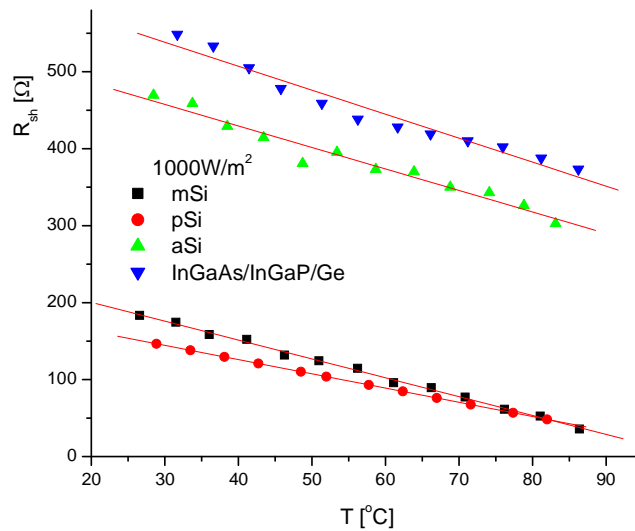
Tabelul 11. Variația coeficientului de temperatură pentru FF [68]

Tip \ Coef.	Iradiață			
	400W/m ²	600W/m ²	800W/m ²	1000W/m ²
mSi	-0.138	-0.141	-0.147	-0.162
pSi	-0.122	-0.130	-0.139	-0.147
aSi	-0.026	-0.031	-0.0411	-0,0487
InGaP/InGaAs/Ge	-5.49E-4	-5.6E-4	-5.76E-4	-5.99E-4

Variația rezistențelor parazite, serie și șunt, în funcție de temperatură este prezentată în Fig. 53.



a)



b)

Fig. 53. Variația rezistențelor parazite în funcție de temperatură: a) rezistența serie; b) rezistența șunt [68]

Rezistența serie și rezistența șunt scad odată cu creșterea temperaturii, având consecințe diferite. Scăderea rezistenței serie conduce la îmbunătățirea performanței celulelor fotovoltaice, în schimb scăderea rezistenței șunt odată cu creșterea temperaturii duce la scăderea performanței celulelor fotovoltaice.

3.5. Sisteme hibride

Există aplicații în care celulele fotovoltaice sau sistemele fotovoltaice nu pot asigura cantitatea de energie necesară, mai ales pentru sisteme autonome – de exemplu case neracordate la rețeaua de electricitate. O soluție a acestei probleme este utilizarea împreună a mai multor sisteme care produc energie. Sistemele de acest tip au fost numite sisteme hibride. Componenta unui astfel de sistem este: sistem fotovoltaic și sistem eolian; sistem fotovoltaic, sistem eolian și generator electric, etc. În cazul utilizării generatorului electric acesta poluează și se dorește înlocuirea lui cu alte surse de energie regenerabilă. Generatorul electric se utilizează doar în cazuri extreme, atunci când sursele de energie regenerabilă nu produc energie, de exemplu: noaptea și dacă nu este vânt, etc. Astfel de sisteme necesită costuri mai mari, spațiu, crează probleme de interconectare și poluare fonică.

Dacă în cazul sistemelor descrise mai sus se produce doar energie electrică, începând cu 1970 s-au propus și studiat sisteme hibride PVT [69,70], compuse din panouri fotovoltaice care sunt montate peste colectoarele termice solare asigurându-se prin construcție un contact termic între ele. Aceste sisteme hibride produc atât energie electrică utilizând panourile fotovoltaice, cât și energie termică folosind colectori termici solari, (vezi Fig. 54). Deoarece aceste componente sunt suprapuse, ele funcționează practic în același spațiu. La sfârșitul anilor 90 și începutul anilor 2000 tehnologia pentru sistemele PVT a devenit una matură [71,72].

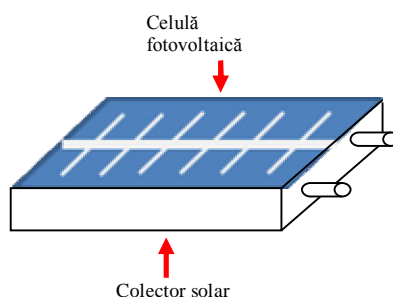


Fig. 54. Sistem hibrid PVT

Un nou tip de sistem hibrid a fost propus la începutul anilor 2000. Structura noului sistem hibrid este: celulă fotovoltaică și generator termoelectric PV-TEG [73-76], (vezi Fig. 55a), iar mai tarziu după 2010 au fost propuse sisteme hibride cu următoarea structură: celulă fotovoltaică, generator termoelectric și colector termic solar PV-TEG-STC [76,77] (vezi Fig. 55b). În cazurile prezentate mai sus generatoarele termoelectrice generează energie electrică datorită diferenței de temperatură dintre fața caldă și cea rece - efectul Seebeck. Au fost propuse de asemenea sisteme hibride de tip PV-TEM [78], în care panoul fotovoltaic este răcit cu ajutorul modulelor termoelectrice alimentate de un alt panou fotovoltaic - efect Peltier.

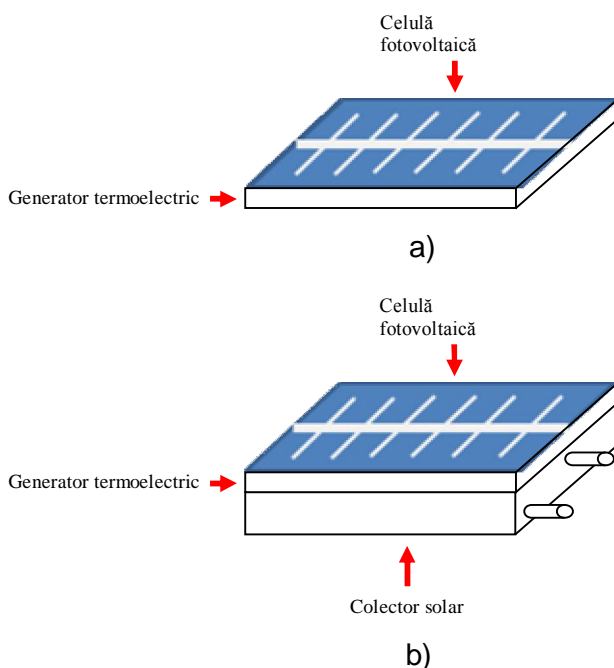


Fig. 55. Sisteme hibride: a) PV-TEG; b) PV-TEG-STC;

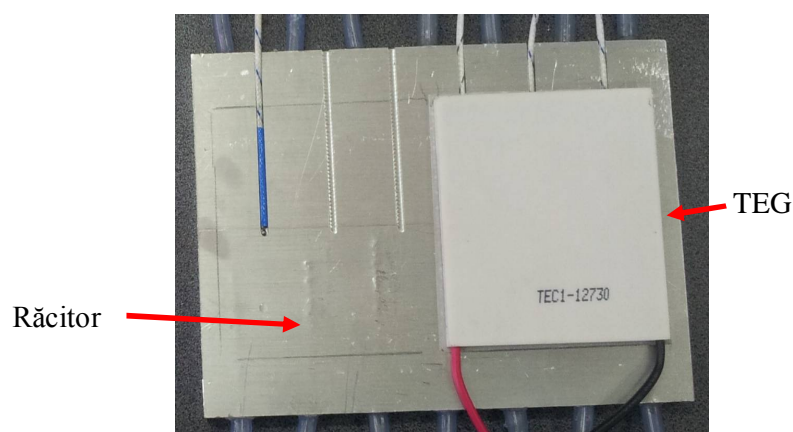
Majoritatea studiilor despre sistemele hibride PV-TEG, dar mai ales PV-TEG-STC erau teoretice sau realizate prin simulare. La finalul anului 2014 am propus proiectul intitulat „Cercetări asupra sistemelor solare hibride fotovoltaice/termoelectrice/termice PV/TEG/STC” pentru competiția „Tinere echipe de cercetare” din cadrul programului național PN-II-RU-TE-2014-4, care a fost finanțat. Obiectivul principal al proiectului a fost dezvoltarea unui sistem hibrid funcțional și testat în condiții reale. Rezultatele obținute pe durata proiectului s-au materializat în publicarea a 17 articole dintre care 4 în reviste ISI, 7 în proceeding-urile unor conferințe ISI și 6 în proceeding-urile unor conferințe internaționale și o cerere de brevet depusă în anul 2017 la OSIM. De asemenea am fost invitat să particip ca și keynote speaker la *International Conference*

on Energy and Mechanical Engineering, 2017, Chengdu, China. Echipa de cercetare a proiectului a fost alcătuită din trei cadre didactice universitare și trei doctoranzi. Pe perioada de desfășurare a proiectului doi dintre doctoranzi au părăsit echipa proiectului din cauza plecării din universitate, sarcinile fiind preluate de ceilalți membri ai echipei de cercetare. Cel de-al treilea doctorand a obținut titlul de doctor în perioada de derulare a proiectului, iar colaborarea începută continuă și după finalizarea proiectului prin diferite activități de cercetare. Activitatea și colaborarea foarte bune avute pe perioada proiectului au constituit puncte benefice pentru dezvoltarea ulterioară a carierei doctorandului. Acesta între timp a obținut prin concurs postul de Șef Lucrări în cadrul Departamentului de Electronică și Calculatoare al Facultății IESC.

Prima etapă pentru realizarea sistemului hibrid de tip PV-TEG-STC a fost testarea diferitelor tipuri de generatoare termoelectrice, de diferite dimensiuni și cu diferite rezistențe interne. Pentru testare a fost construit un stand versatil și flexibil, (vezi Fig. 56). Acesta permite testarea generatoarelor termoelectrice, dar cu modificări minore poate fi adaptat pentru testarea sistemelor hibride de tip PV-TEG.

Sistemul de testare este alcătuit din:

- sistemul de răcire, compus din: răcitor, creat în laborator dintr-un paralelipiped de aluminiu prevăzut cu canale cilindrice prin care circulă apa (vezi Fig. 56a), sistemul de circulație a apei, prevăzut cu debitmetru și un bazin cu apă utilizat pentru a menține constantă temperatura apei la intrarea în răcitor



a)

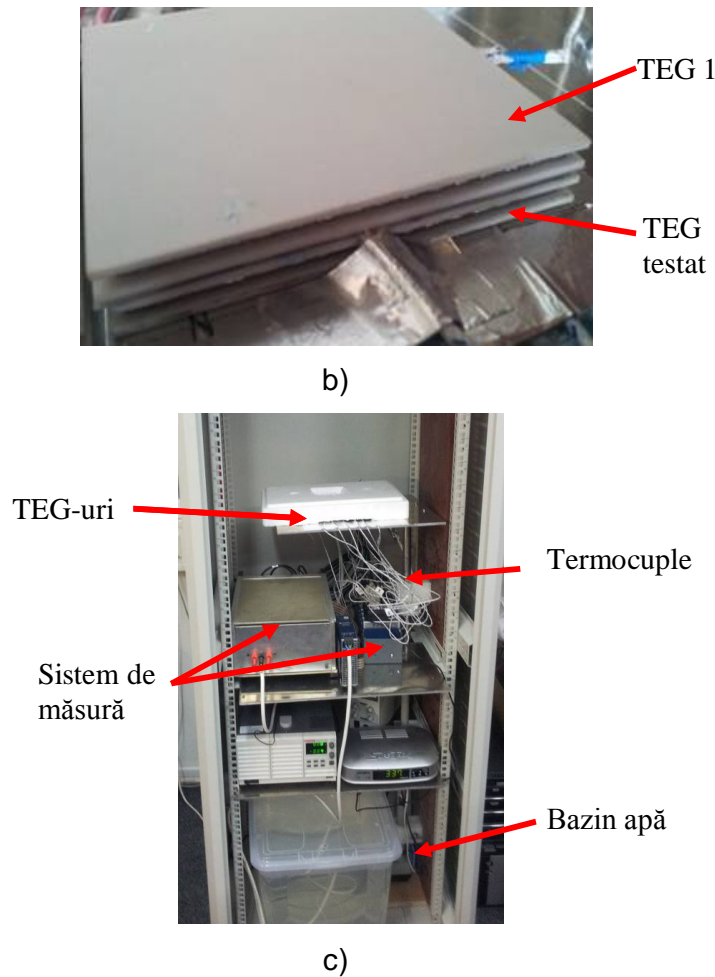


Fig. 56. Sistem de testare TEG-uri: a) TEG de testat; b) tandem de TEG-uri; c) sistemul construit pentru testare [79]

- sistemul de două TEG-uri: unul fiind cel supus caracterizării, iar celălalt folosit pentru încălzirea feței calde a generatorului termoelectric testat (vezi Fig. 56b); ambele TEG-uri din figură au dimensiunile de 6.2 x 6.2 x 0.48 cm și sunt fabricate din Bi_2Te_3 cu rezistență internă de 0.27 Ω (TEG1); au fost testate și alte tipuri de generatoare termoelectrice din Bi_2Te_3 cu dimensiunile de 4 x 4 x 0.33 cm (TEG2) și rezistență internă de 1.08 Ω sau 4 x 4 x 0.4 cm și rezistență internă de 2.4 Ω (TEG3)
- sistemul de măsurare compus din sarcina electronică dezvoltată în laborator, platforma NI cRIO cu modulele pentru măsurarea intensității curentului electric și a tensiunii, modulul de măsurare a temperaturii, termocuple – trei poziționate între răcitor și TEG, trei între cele două generatoare termoelectrice
- bandă dublu adezivă termoconductoare utilizată pentru asigurarea unui contact termic între răcitor și TEG și între TEG-uri.

În urma testelor efectuate au fost alese primele două TEG-uri prezentate mai sus. Cele mai bune rezultate au fost obținute pentru generatorul termoelectric cu dimensiunile de 6.2 x 6.2 x 0.48 cm. În Fig. 57 sunt prezentate caracteristicile curent tensiune și putere tensiune pentru TEG1 măsurate la variate diferențe de temperatură între fața caldă și cea rece, intervalul de variație fiind între 3°C și 24.2°C.

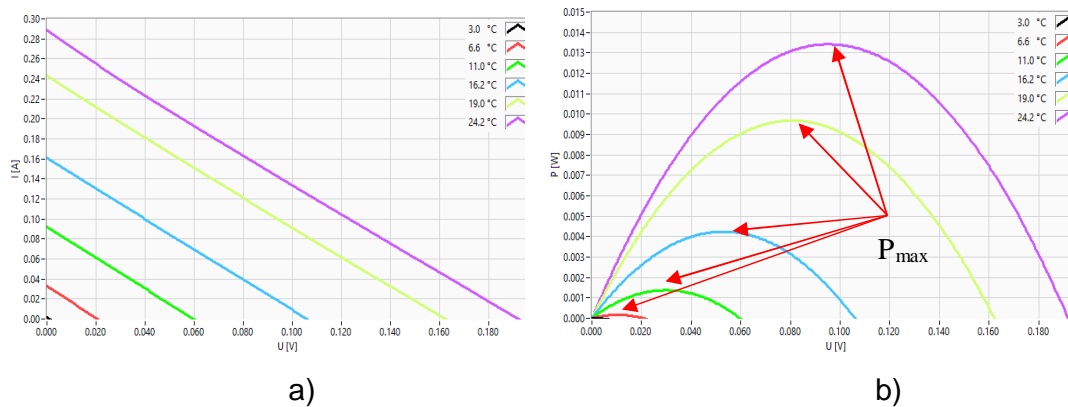


Fig. 57. Caracteristicile pentru TEG1: a) curent tensiune; b) putere tensiune [79]

Considerând variația puterii maxime generate de TEG1 în funcție de tensiune s-a obținut prin fitare o dependență parabolică (funcție de gradul doi), vezi ecuația (18), [79]. Utilizând această dependență putem estima puterea maximă generată de TEG1 pentru diferite diferențe de temperatură.

$$P_{\max} = 0.039 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T^2 - 0.032 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T - 0.1 \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

Pentru a obține un sistem hibrid performant, dar și pentru a determina caracteristicile pentru diferite sisteme s-au ales trei tipuri de celule fotovoltaice: siliciu monocristalin, siliciu policristalin și siliciu amorf. Alegerea acestor tipuri de celule fotovoltaice a ținut cont de performanțele lor, gradul de utilizare și de disponibilitate lor pe piață.

Celulele de siliciu monocristalin și siliciu policristalin au fost tăiate în laborator la dimensiunile TEG1 pentru a acoperi fața caldă, astfel încât toate elementele Peltier ce alcătuiesc generatorul termoelectric să fie la aceeași temperatură. Rezultatele obținute au fost publicate în articolul prezentat la conferința ICIR Euroinvent 2016 de la Iași și publicat în IOP conferences series [80].

Pentru testarea sistemelor hibride propuse, sistemul de testare realizat și prezentat în Fig. 56 a fost upgradat (vezi Fig. 58).

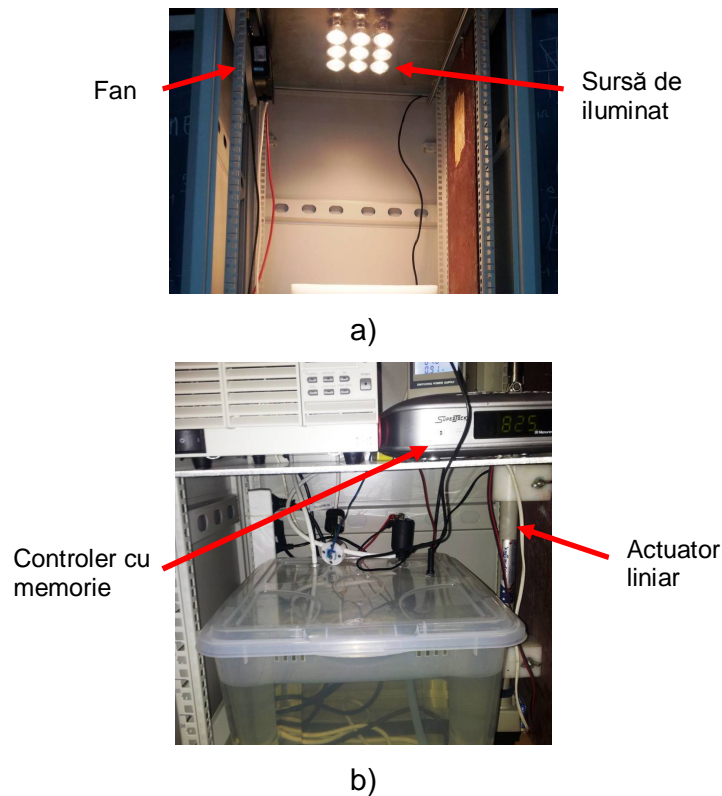


Fig. 58. Componentele adăugate sistemului de testare [80]

Sursa de iluminat, (vezi Fig. 58a), este alcătuită din nouă becuri de halogen cu oglindă de aluminiu. Puterea fiecărui bec este de 50 W. Zona iluminată cvasi omogen are dimensiunile 9 cm x 9 cm. Becurile sunt alimentate utilizând o sursă de tensiune de curent continuu programabilă. Pentru a varia nivelele de iluminare a celulelor fotovoltaice este folosit un actuator liniar prevăzut cu un controler cu memorie astfel încât sistemul să poată fi adus în poziția dorită ce corespunde unei anumite valori a iradianței (vezi Fig. 58b). O altă posibilitate este de a varia tensiunea și curentul folosind sursa programabilă. În acest caz se introduc erori cauzate de schimbarea spectrului sursei de iluminat, fiind recomandată utilizarea ei pentru variații mici ale iradianței.

În Fig. 59 este prezentat sistemul hibrid alcătuit din celula fotovoltaică de siliciu monocristalin (mSi) și generatorul termoelectric (TEG1). Acesta este în contact termic cu răcitorul pentru a menține temperatura cvasiconstantă pe fața rece a generatorului termoelectric. Contactul termic este realizat cu o bandă dublu adezivă termoconductoare atât pentru mSi și TEG1, cât și pentru TEG1 și răcitor.

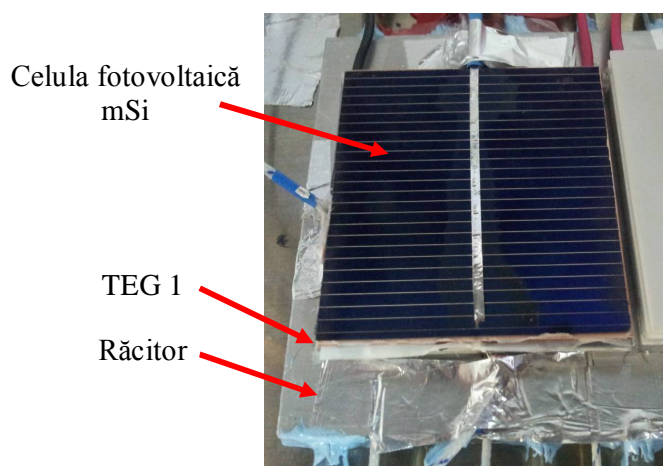


Fig. 59. Sistem hibrid mSi și TEG1 [80]

Rezultatele testelor obținute în cazul celor trei sisteme hibride considerate sunt prezentate în Tabelul 12 [80]. Măsurătorile au fost făcute pentru diferite nivele de iluminare, de la 720 W/m^2 la 1080 W/m^2 . Parametrii considerați sunt tensiunea de circuit deschis, curentul de scurt circuit și puterea maximă.

Tabelul 12. Parametrii componentelor sistemului hibrid: celula fotovoltaică și generatorul termoelectric [80]

SH	PV						TEG				
	I [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	P _{max} [W]	η [%]	T _{PV} [°C]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	P _{max} [mW]	ΔT [°C]	
mSi/ Bi ₂ Te ₃	720	0.599	1.057	0.474	18.30	28.6	0.064	0.107	1.69	4.4	
	820	0.599	1.214	0.542	18.35	30.0	0.078	0.133	2.59	5.2	
	920	0.599	1.424	0.627	18.93	31.8	0.089	0.155	3.40	5.9	
	1000	0.599	1.533	0.671	18.65	32.5	0.095	0.159	3.77	6.2	
	1080	0.599	1.646	0.716	18.41	33.2	0.101	0.167	4.19	6.8	
pSi/ Bi ₂ Te ₃	720	0.580	0.973	0.418	16.14	29.9	0.057	0.094	1.34	3.7	
	820	0.581	1.114	0.476	16.12	30.8	0.067	0.110	1.84	4.2	
	920	0.582	1.291	0.551	16.62	31.8	0.079	0.130	2.55	4.9	
	1000	0.582	1.394	0.592	16.43	32.5	0.087	0.144	3.14	5.4	
	1080	0.583	1.512	0.639	16.44	33.1	0.094	0.155	3.63	5.9	
aSi/ Bi ₂ Te ₃	720	3.95	0.062	0.075	2.88	30.8	0.073	0.062	1.12	3.4	
	820	3.87	0.070	0.078	2.63	32.4	0.073	0.062	1.15	3.7	
	920	3.81	0.080	0.082	2.48	33.9	0.101	0.088	2.17	4.6	
	1000	3.81	0.086	0.086	2.40	33.7	0.106	0.086	2.36	5.2	
	1080	3.74	0.092	0.087	2.23	35.7	0.118	0.103	2.98	5.5	

Analizând valorile din Tabelul 12 putem observa că sistemul format din mSi și TEG 1 este cel mai performant. Temperatura celulei de siliciu monocristalin este de 33°C la o iradianță de 1080 W/m², ceea ce arată că generatorul termoelectric preia o mare parte din căldură și o transformă în energie electrică. Se observă de asemenea un câștig în putere maximă de peste 14% pentru sistemul hibrid mSi și TEG 1 în raport cu celelalte două sisteme hibride considerate.

Deoarece în condiții reale radiația solară poate varia rapid și cu valori mari, din Fig. 60 se poate deduce timpul necesar ca sistemul să ajungă în regim normal de funcționare. Se poate observa că un astfel de sistem va ajunge să funcționeze normal după șapte - opt minute, dacă iradianța scade spre zero și apoi crește din nou.

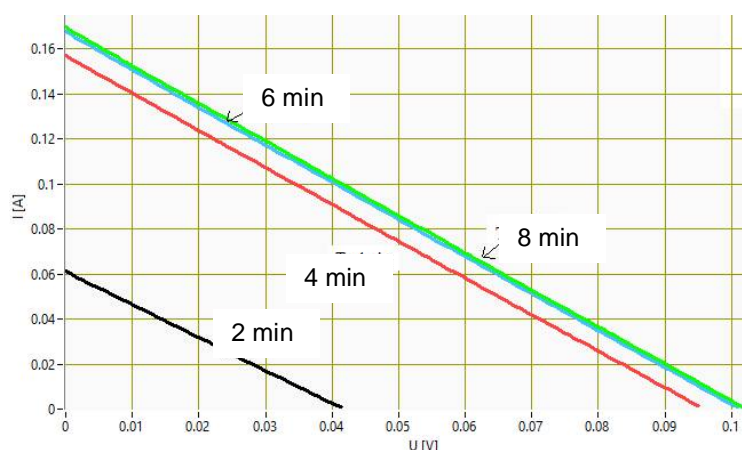


Fig. 60. Caracteristicile curent-tensiune pentru un sistem hibrid PV-TEG în funcție de timp [80]

Plecând de la rezultatele obținute mai sus au fost construite și analizate cinci sisteme hibride PV-TEG-STC, ale căror performanțe au fost prezentate la conferința internațională ECRES, Turcia [81]:

- SH₁ – compus din celulă fotovoltaică de siliciu policristalin cu dimensiunile de 6 cm x 6 cm, generator termoelectric Bi₂Te₃ cu dimensiunile de 6.2 cm x 6.2 cm x 0.48 cm și colector solar creat din țevi de cupru cu diametru de 10 mm (vezi Fig. 61). Contactele termice dintre PV și fața caldă a TEG-ului, STC și fața rece a TEG-ului sunt realizate cu bandă dublu adezivă termoconductoare, cu coeficientul de conductivitate termică de 2.5 W/Km și grosime de 0.1 mm.
- SH₂ – compus din celulă fotovoltaică de siliciu policristalin cu dimensiunile de 6 cm x 6 cm, generator termoelectric Bi₂Te₃ cu dimensiunile de 6.2 cm x 6.2 cm x 0.48 cm și colector solar creat din țevi de cupru cu diametrul de 10 mm

(vezi Fig. 61). Contactele termice dintre PV și fața caldă a TEG-ului, STC și fața rece a TEG-ului sunt realizate cu pastă adezivă termoconductoare, cu coeficientul de conductivitate termică de 1.1 W/Km și grosime de 1 mm .

- SH₃ – compus din celulă fotovoltaică de siliciu policristalin cu dimensiunile de $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, generator termoelectric Bi₂Te₃ cu dimensiunile de $6.2 \text{ cm} \times 6.2 \text{ cm} \times 0.48 \text{ cm}$ și colector solar creat din țevi de alamă cu diametru de 6 mm (vezi Fig. 61). Contactele termice dintre PV și fața caldă a TEG-ului, STC și fața rece a TEG-ului sunt realizate cu bandă dublu adezivă termoconductoare, cu coeficientul de conductivitate termică de 2.5 W/Km și grosime de 0.1 mm .
- SH₄ – compus din celulă fotovoltaică de siliciu policristalin cu dimensiunile de $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, generator termoelectric Bi₂Te₃ cu dimensiunile de $6.2 \text{ cm} \times 6.2 \text{ cm} \times 0.48 \text{ cm}$ și colector solar creat din țevi de alamă cu diametru de 6 mm (vezi Fig. 61). Contactele termice dintre PV și fața caldă a TEG-ului, STC și fața rece a TEG-ului sunt realizate cu pastă adezivă termoconductoare, cu coeficientul de conductivitate termică de 1.1 W/Km și grosime de 1 mm .

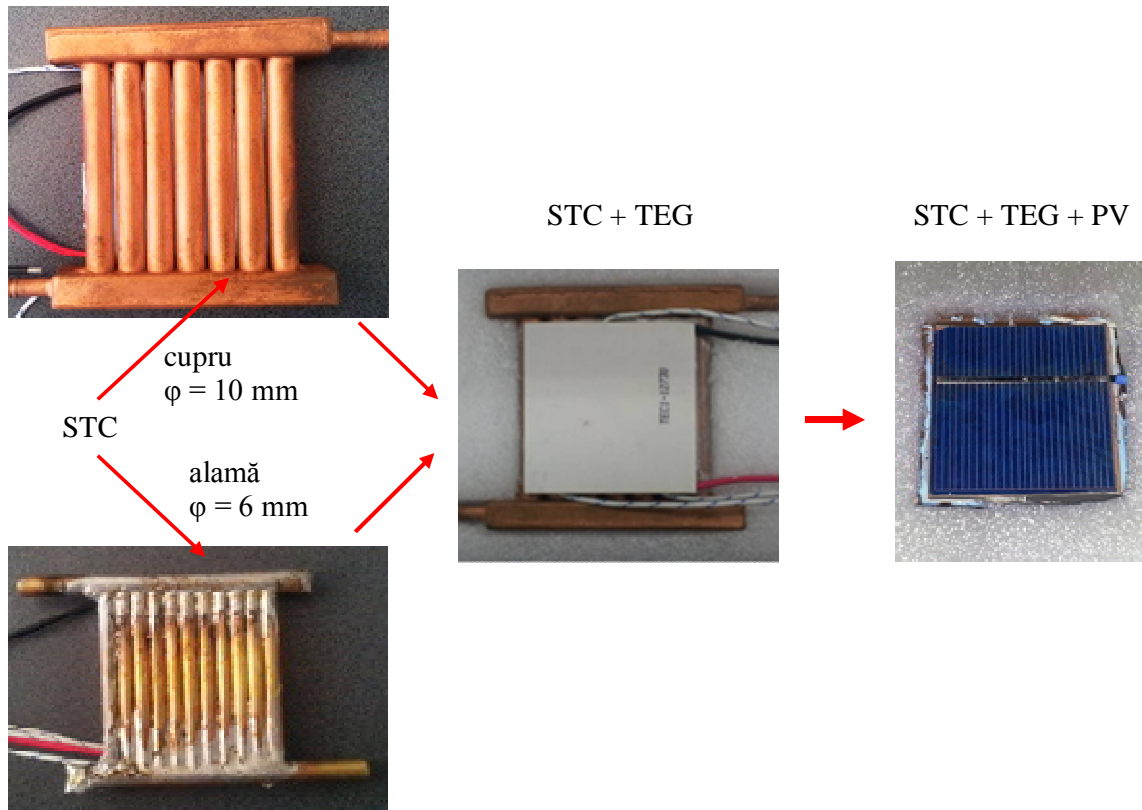


Fig. 61. Sisteme hibride considerate [81]

- SH₅ – compus din celulă fotovoltaică de siliciu policristalin cu dimensiunile de 6 cm x 6 cm, generator termoelectric Bi₂Te₃ cu dimensiunile de 6.2 cm x 6.2 cm x 0.48 cm și colector solar creat din țevi de alamă cu diametru de 6 mm (vezi Fig. 61). Contactul termic dintre STC și fața rece a TEG-ului este realizat cu pastă adezivă termoconductoare, cu coeficientul conductivitate termică de 1.1 W/Km, iar pentru contactul dintre PV și fața caldă a TEG-ului, bandă dublu adezivă grosime de 0.1 mm și s-au eliminat termocuplele dintre PV și fața caldă a TEG-ului.

Studiul acestor cinci sisteme hibride s-a realizat pentru a determina care este cea mai bună configurație și pentru a găsi posibilități de îmbunătățire pentru realizarea unui sistem hibrid ce va fi testat în condiții de iluminare naturală.

Tabelul 13. Valorile parametrilor celor trei componente [81]

SH Par	Rad.	PV					TEG					STC
	I [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	P _{max} [W]	η [%]	T _{PV} [°C]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	P _{max} [mW]	ΔT [°C]	η [%]	
SH ₁	400	0.564	0.524	0.208	14.4	33.9	0.024	0.036	0.21	5.7	21	
	600	0.554	0.789	0.305	14.1	36.7	0.037	0.053	0.47	7.6	25	
	800	0.545	1.04	0.39	13.6	40.8	0.047	0.067	0.77	8.9	28	
	1000	0.538	1.29	0.467	13.0	48.0	0.056	0.077	1.06	10.4	31	
SH ₂	400	0.576	0.524	0.216	15	28.9	0.041	0.063	0.62	8.9	29	
	600	0.574	0.766	0.316	14.6	31.7	0.059	0.092	1.33	11.3	34	
	800	0.571	1.02	0.411	14.3	34.8	0.077	0.12	2.35	13.4	40	
	1000	0.569	1.26	0.5	13.9	36.8	0.094	0.141	3.30	15.2	45	
SH ₃	400	0.565	0.536	0.214	14.8	35	0.032	0.048	0.4	6.1	23	
	600	0.557	0.808	0.316	14.6	40	0.048	0.071	0.82	8.3	27	
	800	0.550	1.07	0.407	14.1	42	0.064	0.089	1.4	12.2	29	
	1000	0.541	1.31	0.482	13.4	44	0.077	0.107	2.04	14.4	33	
SH ₄	400	0.569	0.591	0.237	16.3	29	0.044	0.071	0.751	7.89	31	
	600	0.563	0.861	0.34	15.7	33	0.063	0.102	1.56	11.1	36	
	800	0.558	1.09	0.447	15.6	37	0.079	0.129	2.54	14.6	40	
	1000	0.555	1.29	0.486	13.5	39	0.089	0.141	3.05	16.1	44	
SH ₅	400	0.585	0.537	0.223	15.6	27.3	0.046	0.074	0.85	4.9	29	
	600	0.585	0.803	0.335	15.5	29.6	0.068	0.102	1.81	7.5	38	
	800	0.585	1.02	0.423	14.7	31.4	0.083	0.131	2.72	9.1	43	
	1000	0.583	1.26	0.513	14.3	33	0.102	0.160	4.04	10.5	51	

Rezultatele obținute pentru parametrii importanți ai celor trei componente ale sistemelor hibride în funcție de iradianță sunt prezentate în Tabelul 13 [81]. Nivelele de iluminare variază cu 200 W/m^2 , de la 400 W/m^2 până la 1000 W/m^2 . Debitul prin colectorul solar a fost menținut cvasiconstant la valoarea de $75 \text{ cm}^3/\text{min}$. Observăm o îmbunătățire considerabilă în cazul utilizării pastei termoconductive, deoarece aceasta umple golurile dintre STC și TEG și asigură un contact termic mai bun.

Temperatura pe celula fotovoltaică scade cu 11°C în cazul colectorului solar cu țevi de cupru și cu 5°C pentru cel cu țevi de alamă. În cazul ultimului sistem hibrid considerat, temperatura scade cu încă 6°C . Astfel, de la o temperatură de 48°C pentru celula fotovoltaică, prin utilizarea unor soluții optime pentru realizarea contactelor termice, se ajunge la temperatura de 33°C . Așa cum am arătat mai sus, puterea maximă generată de celula fotovoltaică de siliciu policristalin scade cu 0.38% pe grad dacă temperatura crește, astfel utilizarea celulei fotovoltaice în sistemul hibrid duce la o creștere cu aproximativ 5.7% a puterii generate de celulă. În general, în condiții de iluminare naturală, temperatura celulelor fotovoltaice poate să ajungă la $60\text{-}65^\circ\text{C}$, dar în regiuni semiaride sau aride poate chiar să depășească 80°C , ceea ce necesită răcirea celulelor fotovoltaice. Utilizarea sistemelor hibride poate fi o soluție și în acest caz.

Găsirea unor soluții optime pentru contactele termice duce la o îmbunătățire în cascadă și pentru puterea maximă generată de generatorul termoelectric și pentru eficiența colectorului solar. Astfel se observă că, pentru nivelul de iluminare de 1000 W/m^2 , puterea maximă pentru TEG crește de la 1.06 mW la 4.04 mW , ceea ce înseamnă o creștere de peste 3.8 ori. De asemenea, eficiența colectorului solar crește de la 31% la 51% , ceea ce înseamnă o creștere cu 65% .

Rezultatele obținute pentru sistemele hibride analizate în laborator în condiții de iluminare artificială au fost foarte bune și au condus la realizarea unor sisteme hibride de dimensiuni mai mari, care să fie analizate în condiții de iluminare naturală (condiții reale de lucru). Aceste sisteme hibride sunt compuse din: diferite mini panouri fotovoltaice neîncapsulate realizate în laborator, două sau mai multe generatoare termoelectrice și două tipuri de colectoare solare.

Primul sistem hibrid analizat are în componență două celule fotovoltaice de siliciu monocristalin conectate în serie cu dimensiunile de $15.6 \text{ cm} \times 15.6 \text{ cm}$, două generatoare termoelectrice cu dimensiunile de $6.2 \text{ cm} \times 6.2 \text{ cm} \times 0.48 \text{ cm}$ poziționate pe centrul celulelor fotovoltaice și un colector solar realizat din țevă de cupru cu dimensiunile de $33 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. De asemenea, în același plan cu sistemul hibrid a fost montată o celulă fotovoltaică „geamă” cu celelalte două și un piranometru SPN1 care

permite măsurarea radiației solare globale și a celei difuze. Întreg sistemul aflat în testare a fost montat pe un sistem de urmărire a soarelui pe bolta cerească (sun tracker) realizat în laborator (vezi Fig. 62).

Unul dintre testele importante a fost măsurarea și compararea temperaturii celor trei celule fotovoltaice. Pentru măsurare s-au folosit atât termocuple, cât și o cameră de termoviziune – pentru a avea informații asupra distribuției temperaturii pe suprafața celulelor solare.

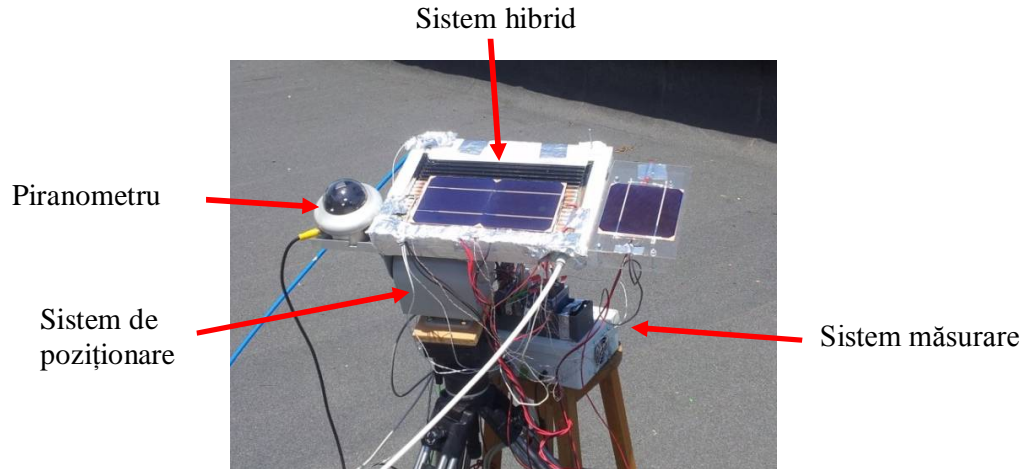


Fig. 62. Sistem de testare a sistemului hibrid în condiții de iluminare naturală

Analizând rezultatele prezentate în Fig. 63 se observă o distribuție uniformă a temperaturii pentru toate cele trei celule fotovoltaice. În cazul celulelor de pe TEG-uri diferența între maxim și minim este de 1.5°C , iar pentru celula nerăcită 1.4°C .

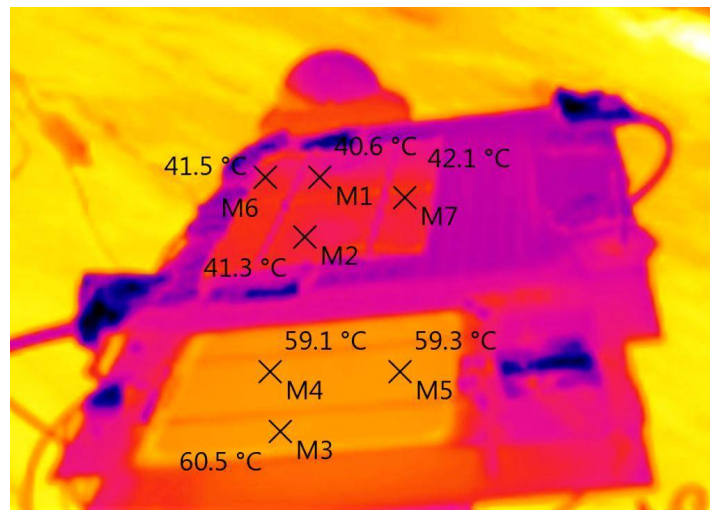


Fig. 63. Distribuția temperaturii

Ceea ce este de remarcă este însă diferența de temperatură dintre celulele componente ale sistemului hibrid și cea nerăcită, diferență care este de 14.4°C, (Fig. 63).

Pentru a îmbunătăți performanțele sistemului hibrid au fost create două mini panouri din patru celule fotovoltaice, siliciu monocristalin (vezi Fig. 64a) și siliciu policristalin (vezi Fig. 64b), conectate în serie și care au fost montate cu bandă dublu adezivă termoconductoare pe o placă de cupru cu grosimea de 1 mm pentru a asigura o distribuție omogenă a temperaturii. O parte a colectorului solar a fost vopsită în negru și a rămas neacoperită pentru a crește eficiența acestuia.

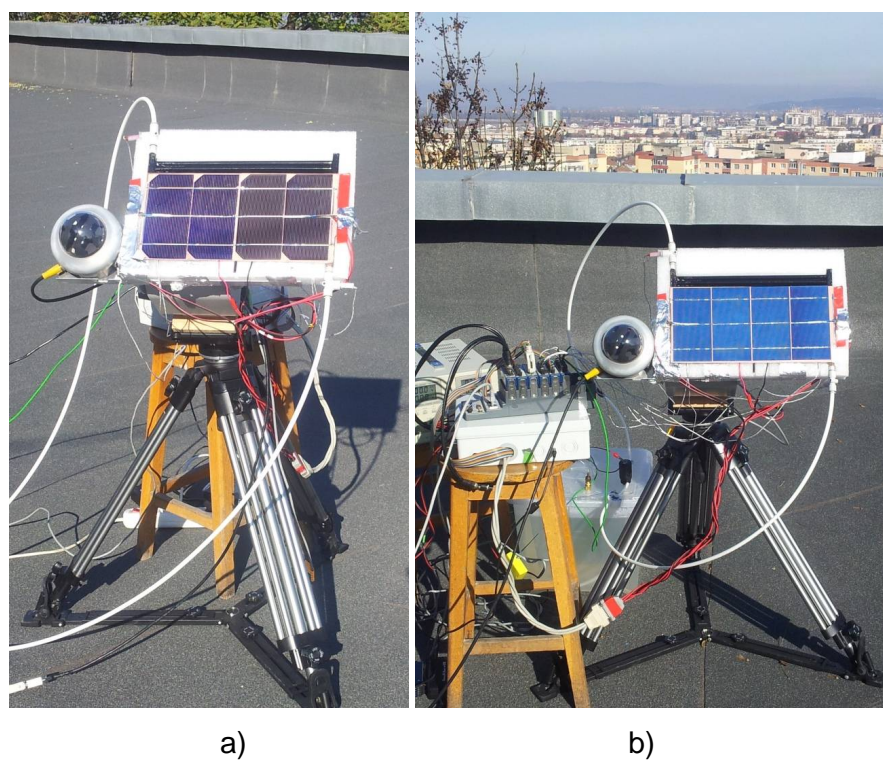


Fig. 64. Sistem hibrid PV-TEG-STC: a) celule fotovoltaice de siliciu monocristalin; b) celule fotovoltaice de siliciu policristalin [82].

Rezultatele obținute utilizând acest sistem hibrid au fost publicate în [82], fiind printre primele rezultate comunicate în literatura de specialitate pentru utilizarea sistemului hibrid în condiții reale.

Distribuția temperaturilor pe suprafața celulelor fotovoltaice în cazul în care apa circulă prin colectorul solar și în cazul când pompa de apă este oprită, este prezentată în Fig. 65. Se observă în ambele cazuri o distribuție cvasi uniformă a temperaturilor, diferența dintre temperaturi fiind mai mică pentru cazul în care apa nu circulă prin

sistem. Diferența de temperatură între cele două cazuri studiate este mare, în jur de 11°C. Această diferență este obținută într-un interval de zece minute, timp în care pompa a fost oprită.

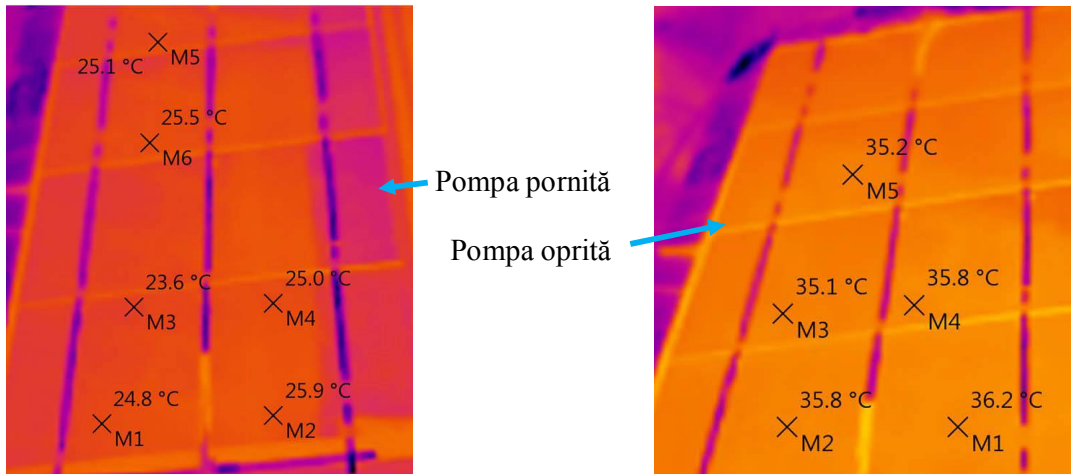


Fig. 65. Distribuția temperaturii pentru două cazuri: cu pompa pornită (stânga) și cu pompa oprită (dreapta) [82]

Puterea maximă generată de mini panoul fotovoltaic de siliciu policristalin și de cele două generatoare termoelectrice este prezentată în Fig. 66.

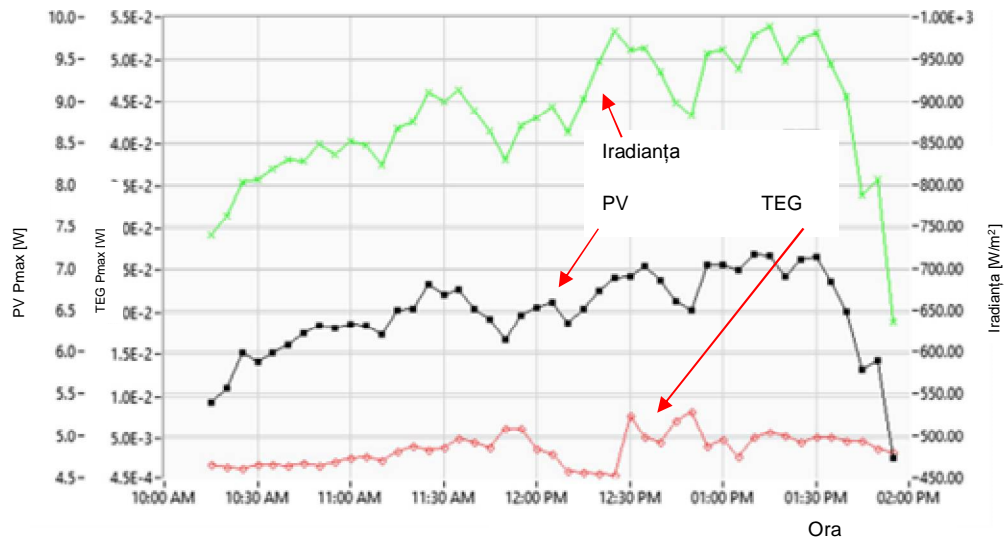


Fig. 66. Iradianța, puterea maximă generată de mini panoul fotovoltaic și de generatorul termoelectric vs timp [82]

Se observă o bună corelare între puterea generată de cele două sisteme și iradianță, cu o ușoară întârziere (defazare în timp) pentru TEG-uri. În intervalul 12.10-12.20 apa nu a circulat prin colectorul solar și se observă o descreștere accentuată a puterii maxime generată de TEG-uri, chiar dacă iradianța a crescut semnificativ, datorită încălzirii feței reci a generatoarelor termoelectrice, micșorându-se astfel diferența de temperatură.

Pentru a crește performanța sistemului hibrid și pentru a-l valida, a fost construit un sistem hibrid pentru încălzirea apei dintr-o mini piscină, compus din: colector solar cu țevi pătrate de cupru pentru a îmbunătăți contactul termic dintre STC și TEG-uri, au fost utilizate 32 generatoare termoelectrice cu dimensiunile 4 cm x 4 cm x 0.33 cm și opt celule fotovoltaice Maxeon (vezi Fig. 67). Rezultatele obținute urmează a fi publicate într-un articol de revistă ISI.



Fig. 67. Sistem hibrid pentru încălzirea apei

Ideea de a încălzi apa pentru o mini piscină s-a concretizat într-o propunere de brevet înregistrată la OSIM în anul 2017, cu titlul: „Sistem hibrid PV/TEG/STC pentru încălzire a apei dintr-o piscină”.

Performanța generatoarelor termoelectrice crește cu creșterea diferenței dintre temperatura feței calde și a celei reci. Celulele fotovoltaice cu multijonctiune au performanțe foarte bune în lumină concentrată, eficiența la peste 500 sori depășind 40%. Temperatura la care pot lucra depășește 80°C fără a le afecta timpul de viață [62]. Plecând de la aceste considerente, am creat noi sisteme hibride bazate pe celule fotovoltaice cu multijonctiune (CPV). Testarea acestor noi tipuri de sisteme hibride s-a

realizat în primă etapă utilizând simulatorul solar al Institutul Paul Scherrer din Elveția. Accesul la infrastructura de cercetare a institutului a fost asigurat prin proiectele de cercetare CORDIS FP7-INFRASTRUCTURES, Sfera II, câștigate ca director de proiect (2016, 2017). Apoi datorită experienței acumulate în utilizarea luminii concentrate s-au creat în laboratorul nostru sisteme ce oferă lumină concentrată utilizând lentile Fresnel.

În anul 2016 au fost create și testate sistemele hibride alcătuite din patru celule CPV cu triplă joncțiune, InGaP/InGaAs/Ge, cu dimensiunile de 1 cm x 1 cm, TEG1 și 4 TEG2 – uri și un sistem de răcire creat în laborator. Sistemul de testare este prezentat în Fig. 68 și este compus din lampă cu descărcare de Xenon, un mixer optic care asigură o arie necesară iluminată cvasi uniform, sistemul de circulație a apei, sistemul de măsurare și o masă suport care poate fi poziționată cu precizie de 1 mm pe trei axe. Sistemul de măsură dezvoltat în laborator permite măsurarea simultană a caracteristicilor curent tensiune pentru CPV-uri și TEG și măsurarea temperaturilor pe fața caldă și rece a TEG-ului și a CPV-urilor. Pentru a găsi aria necesară iluminată uniform s-a făcut inițial o mapare, determinându-se poziția. Pentru această operație s-a folosit un piranometru răcit cu apă – termogage. Sistemul hibrid a fost poziționat ulterior pe poziția determinată.

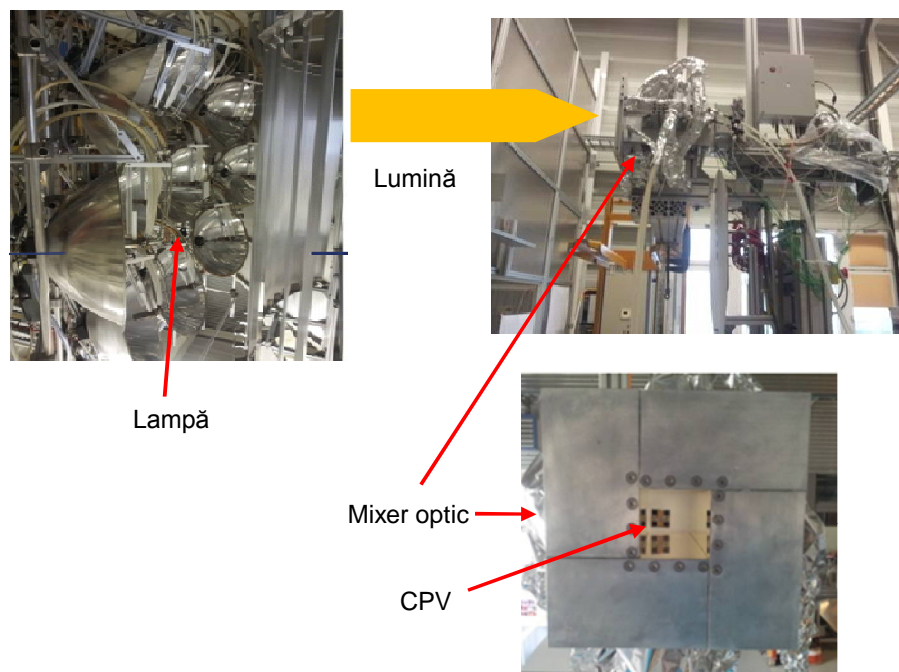
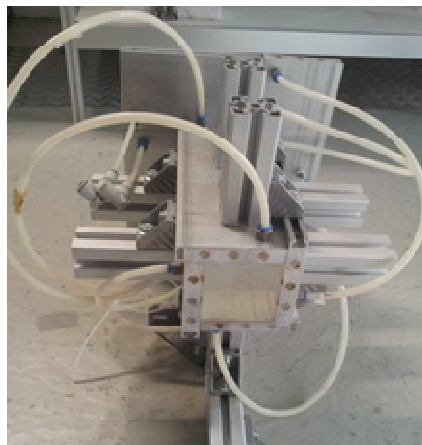
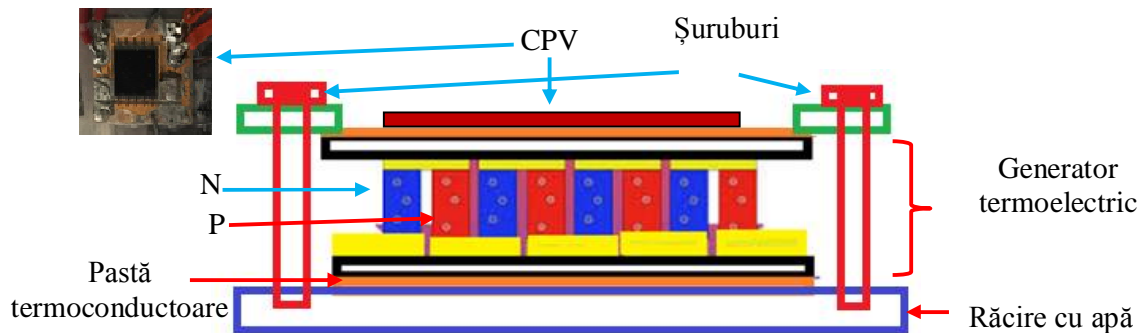


Fig. 68. Sistemul de testare pentru sistemul hibrid cu CPV [83]

Sistemele hibride au fost testate în lumină concentrată la 30 sori și 120 sori. Rezultate mai bune s-au obținut pentru sistemul hibrid cu patru TEG2, aria acestora fiind de 1.67 ori mai mare. De exemplu, la iluminarea de 120 sori, puterea maximă generată de TEG a crescut de la 0.29 W la 0.8 W, iar puterea maximă generată de CPV a crescut de la 6.12 W la 6.6 W, datorită unei răcirii mai bune a CPV-urilor. Rezultatele complete sunt publicate în articolul [83] prezentat la conferința internațională OPTIM.

În anul 2017, printr-o colaborare deschisă prin proiectul „Tinere echipe” menționat mai sus, am creat o echipă mixtă româno daneză, partenerii danezi fiind de la Universitatea Aalborg din Danemarca. Testele realizate la Institutul Paul Scherrer din Elveția s-au axat atât pe sisteme hibride CPV-TEG, dar cu o singură celulă fotovoltaică și un singur TEG de dimensiuni mici 1 cm x 1 cm, cât și pe STEG – generatoare termoelectrice expuse direct iluminării.



Mixer optic



Sistemul hibrid de testat protejat cu aluminiă

Fig. 69. Sistemul de testare pentru sistemul hibrid cu CPV [84]

Componenta sistemului pentru testare este aceeași ca în cazul prezentat mai sus (vezi Fig. 69). Pentru a obține un contact termic bun s-au folosit șuruburi pentru a putea

aplica presiune pe suportul celei fotovoltaice. Analiza sistemului hibrid a fost realizată la diferite nivele de iluminare. În Fig. 70 sunt prezentate rezultatele obținute pentru tensiunea de circuit deschis a celei fotovoltaice, respectiv pentru TEG.

Rezultatele experimentale obținute prin măsurători în condiții de laborator au fost comparate cu cele obținute prin simulare (numeric) obținându-se valori foarte apropiate. Rezultatele complete sunt publicate în articolul de revistă ISI [84].

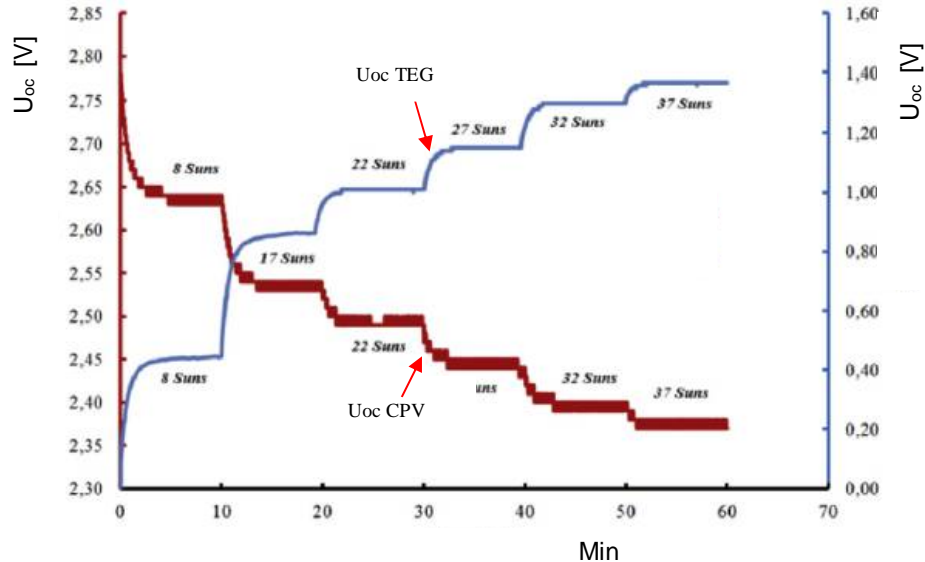


Fig. 70. Variația tensiunii de circuit deschis [84]

Sistemul CPV-TEG a fost analizat și în condiții de variație rapidă a iradianței, după un anumit tipar prezentat în Fig. 71.

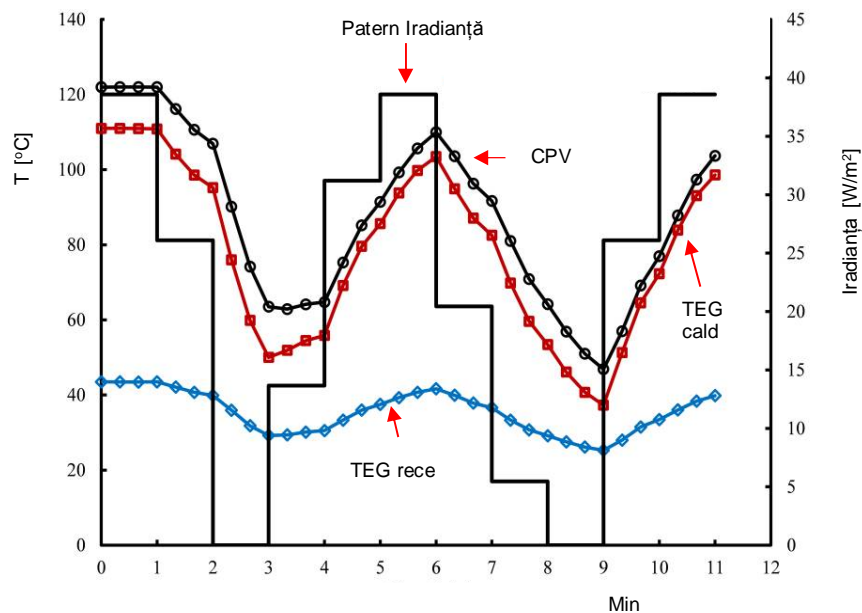


Fig. 71. Variația temperaturilor componentelor vs paternul iradianței [85]

Acest aspect este foarte important pentru funcționarea sistemului hibrid în cazul zilelor noroase. Se observă o corelare foarte bună între variația temperaturilor componentelor sistemului hibrid și variația iradianței.

În Fig. 72 sunt prezentate valorile puterii maxime generate de CPV, obținute experimental, comparativ cu cele obținute prin simulare (numeric). Se observă o supraestimare în cazul numeric. Acest lucru apare deoarece temperatura obținută prin simulare este mai mică decât temperatura reală a celulei fotovoltaice din timpul experimentului. Analiza puterii maxime generate de cele două componente ale sistemului hibrid arată că puterea maximă generată de CPV urmărește tiparul iradianței cu acuratețe în timp ce puterea maximă generată de TEG urmărește tiparul gradual (cu întârziere). Rezultatele complete sunt publicate în articolul de revistă ISI [85].

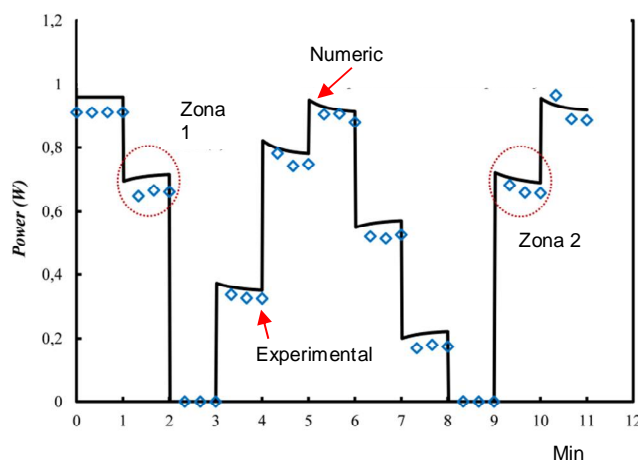


Fig. 72. Variația puterii maxime funcție de tiparul iradianței [85]

Generatoarele termoelectrice pot fi împărțite în trei categorii: prima categorie este pentru temperaturi mici, de până la 200°C având ca reprezentant Bi_2Te_3 ; a doua categorie, pentru temperaturi medii de până la 600°C, având ca reprezentant PbTe ; iar a treia categorie, pentru temperaturi ridicate, 850-1000°C, având ca reprezentanți SiGe și Oxid de Mangan Calciu (CaMnO_3), (vezi Fig. 73). În aplicații unde se folosește lumina concentrată, temperaturile la care poate ajunge fața caldă a TEG-ului sunt ridicate și se pot folosi doar generatoare termoelectrice din ultimele două categorii. Pentru experiment am optat pentru un TEG de CaMnO_3 . Pentru o mai bună absorbție a căldurii, partea caldă a fost acoperită cu bandă de grafit. Apare însă un dezavantaj și anume micșorarea temperaturii de lucru la 550°C. Rata de concentrare a luminii a fost de până la 350 sori, variația făcându-se la intervale de 1 minut.

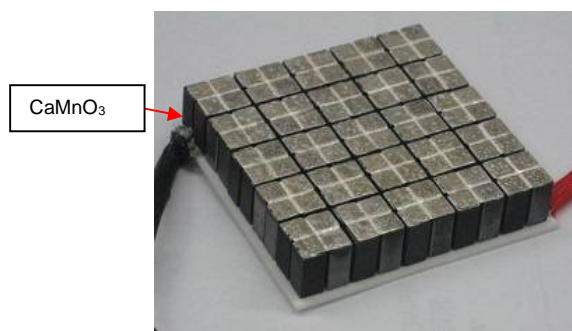


Fig. 73. STEG CMOM [86]

În Fig. 74 este prezentată variația parametrilor importanți ai TEG-ului testat: puterea maximă, curentul de scurt circuit și tensiunea de circuit deschis în funcție de tiparul ales pentru iradianță. Se observă o bună corelare între variația parametrilor și variația iradianței. Rezultatele complete obținute pentru STEG au fost publicate în articolul de revistă ISI [87].

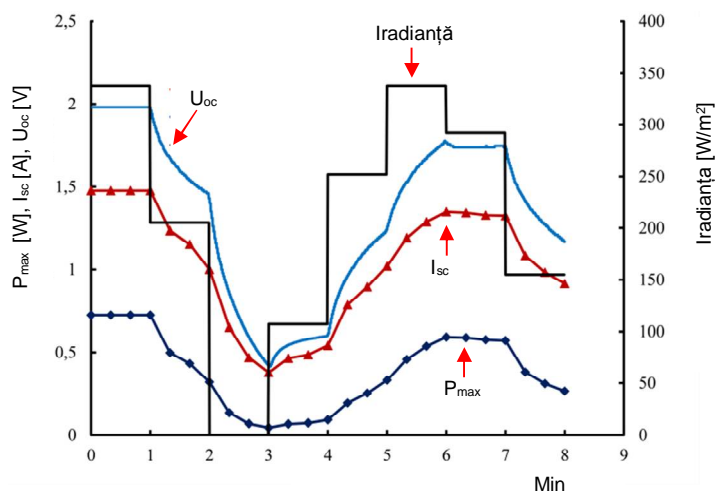


Fig. 74. Variația puterii maxime, curentului de scurt circuit și a tensiunii de circuit deschis vs timp [87]

Pentru caracterizarea celulelor fotovoltaice și a sistemelor hibride în lumină concentrată naturală a fost dezvoltat un sistem ce utilizează o lentilă Fresnel cu dimensiunile de 32 cm x 32 cm și care poate oferi o rată de concentrare în jur de 800 sori pentru o arie de 1 cm² și o rată de concentrare de aproximativ 56 sori pentru o suprafață cu dimensiunile de 4 cm x 4 cm (vezi Fig. 75). Rezultatele obținute cu acest sistem au fost prezentate în articolul de revistă [88].



Fig. 75. Sistem de concentrare a luminii

Continuarea și aprofundarea studiului sistemelor hibride PV-TEG și PV-TEG-STC în lumină naturală și lumină concentrată constituie o direcție de dezvoltare ulterioară. Posibilitatea accesării infrastructurii de cercetare a unor Institute de cercetare ca PSI Villigen Elveția, DLR Julich Germania prin programul Sfera crează premisele realizării unor cercetări comparative ale sistemelor hibride. Dezvoltarea și testarea surselor de energie „harvesting”, pentru senzori de putere mică, bazate pe sistemul hibrid, pe componentele acestuia sau alte dispozitive, de exemplu generatoare piezoelectrice constituie o altă direcție de dezvoltare. Temele pentru viitoarele teze de doctorat bazate pe direcțiile de dezvoltare enumerate mai sus sunt actuale și provocatoare, iar posibilitatea doctoranzilor de a accesa infrastructura unor institute de cercetare de renume constituie o experiență benefică pentru dezvoltarea și succesul acestora.

3.6. Model de estimare a radiației solare

Cunoașterea potențialului energetic al zonei este foarte importantă pentru realizarea unor ferme de panouri fotovoltaice. Acest potențial poate fi determinat prin măsurători, dar acestea necesită un timp îndelungat, prin estimare utilizând modele sau utilizând baze de date, dar care majoritatea sunt contra cost.

Există două modele globale pentru estimarea radiației solare globale orizontale ca medie lunară: modelul Rietveld – ecuația (19) și modelul Page – ecuația (20), cel din urmă fiind doar pentru locații cuprinse între latitudinile 40° N și 40° S [88].

$$\frac{H}{H_o} = 0.18 + 0.62 \frac{n}{N} \quad (19)$$

$$\frac{H}{H_o} = 0.23 + 0.48 \frac{n}{N} \quad (20)$$

unde: H este media lunară a radiației solare globală orizontală, H_o este media lunară a radiației solare extraterestrială, N durata medie lunară a zilei, iar n durata medie lunară cu soare [88].

Între anii 2008 și 2012 am măsurat radiația solară orizontală globală și cea difuză pentru a putea determina un model de estimare pentru cele două componente ale radiației solare și verificarea celor două modele globale. Radiația directă se poate determina ușor știind cele două componente.

Analizând datele obținute am dezvoltat un model mixt - Cotfas pentru zona Brașov cu rezultate foarte bune dat de ecuația (21). Pentru validare s-a utilizat un set de date din anul 2005 [88].

$$H = H_o \left(\begin{array}{l} -2.457 + 32.997 \frac{n}{N} - 150.58 \left(\frac{n}{N} \right)^2 + 336.64 \left(\frac{n}{N} \right)^3 \\ -363.88 \left(\frac{n}{N} \right)^4 + 152.512 \left(\frac{n}{N} \right)^5 \end{array} \right) \text{for August - April} \quad (21)$$

$$H = H_o \left(0.325 + 0.41 \frac{n}{N} + 0.0479 \ln \left(\frac{n}{N} \right) \right) \text{for May - July}$$

Valorile obținute utilizând cele două modele globale și modelul mixt dezvoltat sunt prezentate comparativ cu cele de referință (vezi Fig. 76). Se observă o foarte bună potrivire între valorile de referință și cele obținute cu modelul mixt. Diferența dintre valorile de referință și cele estimate (anual) este de 4.84% pentru modelul Rietveld, 8.12% pentru modelul Page și 0.32% pentru modelul mixt [88].

Pentru estimarea radiației difuze prin analiza modelelor utilizate cel mai bun model pentru zona Brașov este modelul polinomial de ordinul trei dat de ecuația (22) [88].

$$H_d = H \left(-4.313 + 35K_T - 77.5K_T^2 + 53.86K_T^3 \right) \quad (22)$$

unde: H_d este media lunară a radiației difuze, iar K_T este indicele de claritate.

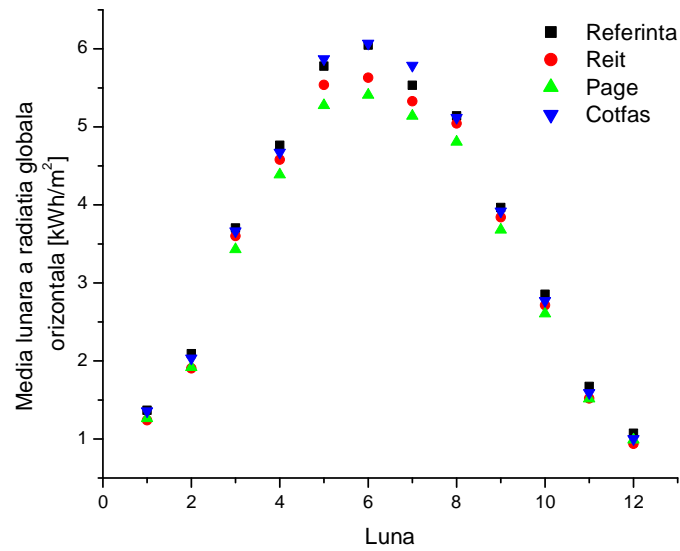


Fig. 76. Comparația dintre valorile obținute cu modele și cele de referință

Comparând rezultatele obținute cu modelul propus și cele obținute cu modelul multi-local propus de Bortolini se observă că diferența dintre valorile de referință și cele estimate (anual) este de 12.17% pentru modelul Bortolini și de doar 0.52% pentru modelul propus [88].

Putem concluziona că modelele globale pot oferi rezultate cu erori mari, ceea ce înseamnă că pentru o acuratețe bună sunt necesare modele locale.

B2. Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

Activitatea profesională după obținerea titlului de doctor mi-am desfășurat-o ca membru al Catedrei de Fizică și apoi din anul universitar 2011-2012 în cadrul Departamentului de Electronică și Calculatoare, din cadrul Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor. Activitatea de cercetare o desfășor în cadrul centrului de cercetare C13 *Sisteme electronice incorporate și comunicații avansate* de la Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov, ce are în componență membri ai departamentului mai sus amintit.

Ulterior obținerii abilitării îmi doresc continuarea activității de cercetare în cadrul aceluiași centru de cercetare cu mențiunea dezvoltării unei colaborări mai bune cu membrii altor centre de cercetare din cadrul institutului și nu numai.

Evoluția carierei mele universitare o văd ca o interdependență între activitatea de cercetare și cea didactică. În zilele noastre este foarte important pentru studenți să fie aproape cu un pas înainte față de ceea ce apare în literatura de specialitate sau pe piață. Acest lucru poate fi viabil dacă cursurile care se pretează vor fi îmbunătățite și înnoite cu ceea ce profesorii cercetează și descoperă, dacă sunt atrași să lucreze, să participe activ la experimente, să analizeze date și să învețe să le disemineze la un nivel înalt. Astfel, îmi propun să continui și să dezvolt ceea ce am început și anume implicarea studenților în activitatea de cercetare și diseminare. Pot enumera câteva realizări în acest sens: participarea studenților la conferințe internaționale cu rezultate ale cercetării, unul dintre articole obținând premiul întâi la *conferința Remote Engineering & Virtual Instrumentation*, Bilbao, June 2012, F. Corciova, D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, *Embedded system for mini solar vehicle*, scriere de capitole de carte - P. A. Cotfas, D. T. Cotfas, D. Ursutiu, C. Samoila, **D. Iordache**, "Chapter 3 New Tools in Hardware and Software Design Applied for Remote Photovoltaic Laboratory", Abul K.M. Azad, A.K.M., Auer, M., V. Judson Harward, V.J. "Internet Accessible Remote Laboratories: Scalable E-Learning Tools for Engineering and Science Disciplines", IGI Global, pp. 40-59, 2012, cooptarea tinerilor masteranzi și doctoranzi în echipele de cercetare ale unor proiecte, de exemplu PN II – Tinere echipe de cercetare, coordonarea unor lucrări de licență și disertație și coordonarea studenților pentru participarea la Cercurile științifice studențești. Rezultatele bune și experiența dobândită în activitatea de cercetare au condus la dezvoltarea de aptitudini și competențe care îmi permit introducerea de noi cursuri, mai ales la programele de masterat. Bineînțeles,

experiența dobândită în activitatea de cercetare se poate valorifica cel mai fructuos în cazul îndrumării tinerilor doctoranzi.

La început, cercetarea științifică s-a desfășurat pe un domeniu mai îngust, în principal bazat pe testarea celulelor fotovoltaice. Cu pași mici, dar siguri, domeniul a fost extins astfel încât acum cercetarea acoperă conversia energiei solare în energie electrică și termică (testarea sistemelor fotovoltaice, sisteme hibride de tip: PVT, PV-TEG, PV-TEG-STC, energy harvesting, alimentarea senzorilor cu energie produsă de sistemele de tip hibrid, dezvoltarea de modele pentru radiația solară, etc), sisteme fotovoltaice și eoliene de mici dimensiuni, sisteme electronice de caracterizare și testare. De asemenea, un câștig major este dezvoltarea abilităților de a lucra cu mediul industrial prin granturile cu terți, realizarea unor sisteme de măsură și monitorizare la scară industrială (IAR Ghimbav), dezvoltarea de prototipuri funcționale (Steinel), unele dintre ele fiind deja pe piață ca produse finite. Domeniul în care îmi desfășor activitatea de cercetare științifică și în care doresc să obțin atestatul de abilitare consider că este unul atrăgător, foarte actual și cu potențial pentru viitorii doctoranzi. Temele ce vor fi propuse pentru viitoarele teze de doctorat vor urma direcțiile de cercetare asumate în secțiunea anterioară, dar vor ține cont și de competențele și cercetarea proprie a viitorilor doctoranzi pentru a asigura finalizarea cu succes a tezelor de doctorat.

Activitatea de cercetare s-a concretizat într-un număr de:

- 5 cărți sau capitole de cărți, 1 curs și trei îndrumare de laborator
- 45 articole publicate în jurnale și proceedings ISI (două dintre articole fiind publicate în jurnale cu factor de impact mai mare de 9), dintre care 5 fiind publicate în reviste din Q1 și 2 în reviste din Q2. Factorul de impact (ISI) cumulativ este 57.44.
- 15 articole publicate în reviste și conferințe BDI (acceptate de comisia Electronică, Telecomunicații și Nanotehnologie)
- 27 articole în conferințe internaționale
- 15 articole în conferințe naționale
- 4 proiecte câștigate prin competiție internațională ca director și participare ca membru în 7 proiecte internaționale
- 2 proiecte câștigate prin competiție națională ca director și participare ca membru în 6 proiecte naționale
- 2 proiecte cu terți - cu sumă mai mare de 10000 USD și 6 cu sumă mai mică de 10000 USD
- 2 cereri de brevet depuse la OSIM.

Recunoașterea activității de cercetare pe plan internațional s-a materializat prin:

- 100 de citări ale cărților și articolelor, dintre care majoritatea sunt citări în jurnale ISI cu factor de impact mare (aproape 400 citări în Google Scholar). Menționez că indicele Hirsch este 5 conform ISI Knowledge, 7 conform Scopus și 9 conform Google Scholar.
- referent pentru următoarele jurnale ISI: Solar energy, Renewable energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Journal of Solar Energy Engineering, Energy Science & Engineering, Indian Journal of Pure and Applied Physics, IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, Surface and Coatings Technology, Bulgarian Chemical Communications, International Journal of Green Energy, Meteorology and Atmospheric Physics, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Measurement, Silicon, Heliyon, Applied Energy, dar și pentru numeroase conferințe internaționale
- lead editor pentru International Journal of Photoenergy (special issue)
- membru (sau fost membru) al unor organizații internaționale și naționale: International Association of Online Engineering, IEEE, Global Earth Observing System of Systems Community IEEE, Smart Cities IEEE, IEEE Communications Society Membership, Romanian Physics Society, Creding
- organizarea de conferințe internaționale și naționale
- premii naționale și internaționale, dintre care aș aminti: National Instruments Graphical System Design Achievement Awards 2013 Education Winner, National Instruments Graphical System Design Achievement Awards 2013 NI Community's Choice, National Instruments Graphical System Design Achievement Awards 2013 Editor's Choice Award, Medalia de aur la Euroinvent 2015, Iași.
- profesor invitat la școli de vară și cursuri de master (opt invitații) și două invitații ca Keynote Speaker.

Menționez că am depășit standardele minime CNATDCU pentru Comisia de Inginerie Electronică, Telecomunicații și Nanotehnologie, punctajul cumulată realizat este 1819 față de 850 cel minim.

Direcții pentru dezvoltarea carierei:

- obiectivul principal este de a obține abilitarea în domeniul *Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale* și de a putea coordona studenții la doctorat. În ultimul timp am acumulat experiență în procesul de coordonator prin participarea în comisii de îndrumare a tinerilor doctoranzi (două) și prin coordonarea

timp de trei luni a unui doctorand de la Aalborg University (S. Mahmoudinezhad), cooptat și în echipa proiectului Sfera II 2017 – colaborarea fiind una de succes, fiind fost publicate trei articole ISI, unul BDI și unul ISI este în proces de recenzie.

- îmbunătățirea procesului de diseminare a cercetării, dar și a muncii didactice prin: publicarea de cărți sau capitole de carte în edituri de prestigiu, cursuri și îndrumare de laborator, articole în jurnale cu factor de impact mare, participarea la conferințe internaționale cu grad mare de participare, participarea la diferite seminarii și workshopuri, gen COST, etc. Un deziderat este ca doctoranzii, prin îndrumare și colaborare, să participe cu succes la procesul de diseminare. Prin participarea la conferințe se urmărește atât aflarea noutăților în domeniu, cât și stabilirea și dezvoltarea unor noi colaborări naționale și internaționale.
- participarea la competițiile pentru obținerea finanțării unor proiecte naționale sau internaționale pentru atragerea de fonduri. În prezent am în proces de evaluare două proiecte: unul în competiția Horizont 2020 - Coordination and Support Actions – Twinning 2018 în parteneriat cu Aalborg University și University of Stuttgart, iar celălalt în competiția PN-III-CEI-BIM-PM 2019 în parteneriat cu Universitatea Angers. Obținerea finanțării conduce la consolidarea parteneriatelor existente, la dezvoltarea unora noi, dar și la îmbunătățirea bazei materiale. În calitate de coordonator, voi îndemna și ajuta doctoranzii să participe activ în proiecte de cercetare, să învețe să redacteze propuneri de proiect și să participe la competițiile dedicate lor.
- un deziderat pentru a fi competitiv în cercetare este și dezvoltarea colaborărilor naționale și internaționale. În acest sens s-au pus bazele unor colaborări fructuoase cu alte universități ca Aalborg University (Danemarca), University of Stuttgart (Germania), Technological Educational Institute of Western Greece (Grecia), University of East Anglia (Marea Britanie), West Pomeranian University of Szczecin (Polonia), Afyon Kocatepe University (Turcia), Paul Scherrer Institute din Elveția, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași (România). Materializarea acestor colaborări constă în publicarea de articole, cărți, capitole de carte, schimb de experiență cu predare, câștigarea de proiecte. De asemenea, au avut loc schimburi de studenți prin programul Erasmus.
- continuarea și dezvoltarea relațiilor cu mediul industrial și economic. Acest lucru va conduce la ancorarea în realitate a cercetării și dezvoltărilor ulterioare, la dezvoltarea împreună de prototipuri sau modele funcționale, îmbunătățirea bazei materiale, la integrarea doctoranzilor în echipe mixte, etc..

- îmbunătățirea bazei materiale a laboratorului de cercetare prin acțiunile prezentate mai sus. În prezent laboratorul de cercetare este dotat prin implicarea membrilor săi și prin sprijinul universității cu simulator solar cu fibră optică A4 LightLine clasa AAA, piranometru SPN1 și piranometru cu senzor fotovoltaic, sisteme electronice de măsurare și control NI cRIO cu modulele aferente și circuite electronice pentru măsurători pentru PV și TEG, cameră de termoviziune cu modul solar, sistem complet de panouri fotovoltaice cu sun tracker, stație meteo completă, două lămpi solare inteligente XSolar L-S, sursă programabilă 1kW, anemometru cu fir, sistem de concentrare cu lentilă Fresnel, sistem de testare *indoor* pentru celule solare, sistem de realizare a circuitelor electronice pentru protipare, osciloscop Agilent, panouri fotovoltaice, platformele de cercetare și educaționale SolarLab și RELab cu softurile aferente, sisteme de calcul, etc...
- propunerea de noi cursuri bazate pe activitatea de cercetare și nevoile industriei. În ultimii ani au fost introduse la programul de master SECI al Facultății IESC două cursuri opționale „Managementul energetic” și „Rețele de senzori low power” a căror titular sunt și pentru care am dezvoltat lucrările de laborator aferente.
- dezvoltarea colaborărilor cu mediul preuniversitar prin implicarea elevilor de gimnaziu și liceu în diferite activități de conștientizare și experimentare, astfel încât să realizăm o punte între mediul preuniversitar și cel universitar. Astfel, în anul 2018, prin proiectul *Learning by doing* elevii de la Colegiul Național Dr. Ioan Meșotă Brașov și Colegiul Tehnic Ioan Șenchea Făgăraș au dezvoltat câteva sisteme bazate pe panouri fotovoltaice. De asemenea, elevii de la Liceul Johannes Honterus Brașov au obținut premiul întâi la concursul organizat de Universitatea Valahia din Târgoviște realizând un sistem PVT (panou fotovoltaic/colector solar).

B3. Bibliografie

- [1] Renewables 2014 Global Status Report, <http://www.ren21.net>
- [2] Renewables 2014 Global Status Report, <http://www.ren21.net>
- [3] Renewables 2014 Global Status Report, <http://www.ren21.net>
- [4] Green MA, Hishikawa Y, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J, Ho-Baillie AWY. Solar cell efficiency tables (version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2018; 26: 427-436.
- [5] <https://us.sunpower.com/solar-panels-technology/x-series-solar-panels/>, accesat ianuarie 2019.
- [6] Chenvidhya D, Kirtikara K, Jivacate C. PV module dynamic impedance and its voltage and frequency dependencies, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005;86:243–51.
- [7] Anil Kumar R, Suresh MS, Nagaraju J. Measurement and comparison of AC parameters of silicon (BSR and BSFR) and gallium arsenide (GaAs/Ge) solar cell used in space application, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2000;60:155–66.
- [8] Kumar S, Sareen V, Batra N, Singh PK. Study of C–V characteristics in thin n⁺-p-p⁺ silicon solar cells and induced junction n-p-p⁺ cell structures, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010;94:1469–72.
- [9] Cotfas DT. *Celule fotovoltaice*, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2010.
- [10] Chenvidhya D, Kirtikara K, Jivacate C. PV module dynamic impedance and its voltage and frequency dependencies, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005;86:243–251.
- [11] Cotfas DT, Cotfas PA, Kaplanis S. Methods and techniques to determine the dynamic parameters of solar cells: Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;61:213–221.
- [12] Chegaar M, Azzouzi G, Mialhe P. Simple parameter extraction method for illuminated solar cells, *Solid-State Electronics*, 2006;50:234–237.
- [13] Cotfas DT, Cotfas PA, Kaplanis S. Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013;28:588–596.
- [14] Bashahu M, Habyarimana A. Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance, *Renewable Energy*, 1995;6:129–38.

- [15] Bashahu M, Nkundabakura P. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors, *Solar Energy*, 2007;81(7):856-863.
- [16] Chan DSH, Phillips JR, Phang JCH. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters, *Solid-State Electronics* 1986;29:329–37.
- [17] Ishibashi K, Kimura Y, Niwano M. An extensively valid and stable method for derivation of all parameters of a solar cell from a single current-voltage characteristic, *Journal of Applied Physics* 2008;103:094507.
- [18] Tivanov M, Patryn A, Drozdov N, Fedotov A, Mazanik A. Determination of solar cell parameters from its current–voltage and spectral characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2005;87:457–65.
- [19] Chegaar M, Ouennoughia Z, Guechi F. Extracting dc parameters of solar cells under illumination, *Vacuum* 2004;75:367–72.
- [20] Haouari-Merbaha M, Belhamelb M, Tobíasa I, Ruiz JM. Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current–voltage curve, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2005;87:225–33.
- [21] Ortiz-Conde A, Sánchez FJG, Muci J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I–V characteristics, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2006;90:352–61.
- [22] Zhang C, Zhang J, Hao Y, Lin Z, Zhu C. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve, *Journal of Applied Physics* 2011;110:064504.
- [23] Garrido-Alzar CL. Algorithm for Extraction of Solar Cell Parameters from I-V Curve Using Double Exponential Model, *Renewable Energy* 1997;10:125-8.
- [24] Kiran E, Inan D. An approximation to solar cell equation for determination of solar cell parameters, *Renewable Energy* 1999;17:235-41.
- [25] Sellami A, Bouaïcha M. Application of the genetic algorithms for identifying the electrical parameters of PV solar generators. In: Kosyachenko LA, editor, *Solar Cells - Silicon Wafer-Based Technologies*, InTech, 2011, p. 349-364.
- [26] Jervase JA, Bourdouden H, Al-Lawati A. Solar cell parameter extraction using genetic algorithms, *Measurement Science and Technology*, 2001;12:1922-5.
- [27] Ye M, Wang X, Xu Y. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization, *Journal of Applied Physics* 2009;105:094502-8.
- [28] Qin H, Kimball JW. Parameter determination of photovoltaic cells from field testing data using particle swarm optimization, *Power and Energy Conference at Illinois (PECI) IEEE* 2011:1-4.

- [29] Sandrolini L, Artioli M, Reggiani U. Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis, *Applied Energy* 2010;87:442–51.
- [30] Priyanka, Mohan Lal, Singh SN. A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2007;91:137–42.
- [31] Cotfas DT, Cotfas PA, Kaplanis S, Ursutiu D. Results on series and shunt resistances in a c-Si PV cell. Comparison using existing methods and a new one, *Journal of optoelectronics and advanced materials* 2008;10:3124–30.
- [32] Bayhan H, Kavasoglu A. Exact Analytical Solution of the Diode Ideality Factor of a pn Junction Device Using Lambert W-function Model, *Turkish Journal of Physics* 2007;31:7 – 10.
- [33] Jain A, Kapoor A. Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2004;81:267-77.
- [34] Charles JP, Ismail MA, Bordure G. A critical study of the effectiveness of the single and double exponential models for I–V characterization of solar cells, *Solid-State Electronics* 1985;28:807–20.
- [35] Cotfas DT, Cotfas PA, Ursutiu D, Samoila C. Current-Voltage Characteristic Raising Techniques for Solar Cells. Comparisons and Applications, International conference on optimization of electrical and electronic equipments, Braşov, Mai 2010, IEEEExplore, Web of Science, Doi:10.1109/OPTIM.2010.5510373.
- [36] Cotfas DT, Cotfas PA, Cătaron A. Using the genetic algorithm to determine the parameters of photovoltaic cells and panels, International Symposium on Electronics and Telecommunications 2018, Timisoara, Romania, 8-9 November, 2018, IEEEExplore, Web of Science, DOI: 10.1109/ISETC.2018.8584016.
- [37] Cotfas DT, Deaconu AM, Cotfas PA. Determining parameters of photovoltaic cells using successive discretization algorithm, *Applied Energy*, 2019 (în proces de recenzie).
- [38] Gao X, Cui Y, Hu J, Xu G, Wang Z, Qu J, Wang H. Parameter extraction of solar cell models using improved shuffled complex evolution algorithm, *Energy Conversion and Management* 2018;157:460–479.
- [39] Chen Z, Wu L, Lin P, Wu Y, Cheng S. Parameters identification of photovoltaic models using hybrid adaptive Nelder-Mead simplex algorithm based on eagle strategy, *Applied Energy* 2016;182:47–57.

- [40] Gong W, Cai Z. Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution, *Solar Energy* 2013;94:209–20.
- [41] Cotfas PA, Cotfas DT. Design and implementation of RELab system to study the solar and wind energy, *Measurement* 2016;93:94-101.
- [42] AlRashidi MR, AlHajri MF, El-Naggar KM, Al-Othman AK. A new estimation approach for determining the I–V characteristics of solar cells, *Solar Energy* 2011;85:1543–50.
- [43] Cotfas PA, Cotfas DT, Borza PN, Dezso S, Teodorescu R. Solar Cell Capacitance Determination Based on an RLC Resonant Circuit, *Energies* 2018;11(3), 672:1-13.
- [44] Cotfas DT, Cotfas PA. Chapter IX: PV Innovative Techniques and Experimental Test Sets, Socrates Kaplanis and Eleni Kaplani “Renewable Energy Systems: Theory, Innovations and Intelligent Applications”, Nova Science Publishers, USA, ISBN: 978-1-62417-744-6, pp. 525-546, 2013.
- [45] Aberle AG, Lauinger T, Bowden S, Wegener S, Betz G. SUNALYZER—a powerful and cost-effective solar cell I–V tester for the photovoltaic community. In: Proceedings of the photovoltaic specialists conference, conference record of the twenty fifth IEEE.1996., pp.593–596.
- [46] Keogh WM, Blakers AW, Cuevas A. Constant voltage I–V curve flash tester for solar cells, *SolarEnergy Materials and Solar Cells* 2004;81:183–96.
- [47] [http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/document/resources/DLCP_PV%20S
OlarCellAppNote.pdf](http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/document/resources/DLCP_PV%20S%20OlarCellAppNote.pdf)
- [48] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-4328ENA.pdf?id=1774786>
- [49] <http://www.abet-technologies.com/literature/Tracer71908.pdf>
- [50] Borza PN, Cotfas DT, Cotfas PA, Pologea A. Improvements on Photovoltaic Cells Test Bench System, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 2012;5(4):38 -41.
- [51] <http://www.ni.com/ni-elvis/>
- [52] Cotfas PA, Cotfas D.T, Ursutiu D, Samoila C. A New Remote Laboratory for the Photovoltaic Cells Study, International Conference Remote Engineering and Virtual Instrumentation REV2008, Dusseldorf, June, 2008, Kassel Press, ISBN978-3-89958-352-6.
- [53] Cotfas P, Cotfas DT, Ursuțiu D, Samoilă C. NI ELVIS Computer-Based Instrumentation, NTS PRESS (National Technology and Science Press), USA Allendale, NJ 07401,2012 (ISBN 978-1-934891-11-7).

- [54] Cotfas PA, Cotfas DT, Ursutiu D, Samoila C, Iordache D. Chapter 3: New Tools in Hardware and Software Design Applied for Remote Photovoltaic Laboratory, Abul KM, Azad AKM, Auer M, Harward VJ. "Internet Accessible Remote Laboratories: Scalable E-Learning Tools for Engineering and Science Disciplines", IGI Global, USA, pp. 40-59, 2012.
- [55] Cotfas DT, Cotfas PA, Ursutiu D, Samoila C. RELab - virtual laboratory of the renewable energy, Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2013 10th International Conference on, Sydney, 2013.
- [56] Cotfas DT, Cotfas PA, Ursutiu D, Samoila C. Mobile virtual laboratory for renewable energy, Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2013 10th International Conference on, Sydney, 2013.
- [57] *** National Instruments, Romanian University Wins 3 Prizes at the Graphical System Design Achievement Awards at NIWeek 2013.
- [58] Cotfas DT, Kaplanis S, Cotfas PA, Ursutiu D, Samoila C. A new albedometer based on solar cells, Proc. World Renewable Energy Congress X. Glasgow, 2008.
- [59] Șerban G, Cotfas DT, Cotfas PA. Significant differences in crop albedo among romanian winter wheat cultivars, Romanian Agricultural Research 2011;28:11-15.
- [60] Șerban G, Cotfas DT, Cotfas PA. Crop albedo measurements after anthesis reveal significant differences among romanian wheat cultivars, Romanian Agricultural Research 2012;29, ISSN 1222-4227.
- [61] Cotfas DT, Cotfas PA, Borza P, Ursutiu D, Samoila C. Wireless system for monitoring the solar radiation, Environmental Engineering and Management Journal 2011;10(8):1133-1137.
- [62] Cotfas DT, Cotfas PA, Floroian DI, Floroian L. Accelerated life test for photovoltaic cells using concentrated light, International Journal of Photoenergy, 2016.
- [63] Núñez N., González J.R. , Vázquez M., Algora C., Espinet P. Evaluation of the reliability of high concentrator GaAs solar cells by means of temperature accelerated aging tests," Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2013;21:1104–1113.
- [64] <https://www.steinelshop.ro/catalogsearch/result/?cat=134&q=solar>
- [65] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- [66] Cotfas PA, Cotfas DT, Ursutiu D, Samoila C. Tester for photovoltaic charger using NI cRIO, 2012 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bilbao, Spain, 4-6 July 2012.

- [67] Cotfas DT, Cotfas PA. A Simple Method to Increase the Amount of Energy Produced by the Photovoltaic Panels, *International Journal of Photoenergy*, 2014;2014:ID 901581 1-6.
- [68] Cotfas DT, Cotfas PA, Machidon OM. Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2018;2018:ID 5945602 1-12.
- [69] Wolf M. Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion* 1976;16:79–90.
- [70] Florschuetz LW. Extension of the Hottel–Whiller model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy* 1979;22:361–6.
- [71] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion Management* 2006;47:3368–3382.
- [72] Charalambous PG, Maidment GG, Kalogirou SA, Yiakoumetti K. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: a review. *Applied Thermal Engineering* 2007;27:275–86.
- [73] van Sark WGJHM. Feasibility of photovoltaic - Thermoelectric hybrid modules. *Applied Energy* 2011;88:2785-2790.
- [74] Attivissimo F, Lanzolla AML. Feasibility of a photovoltaic – thermoelectric generator: performance analysis and simulation results. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2015;64:1158-1169.
- [75] Y. Deng, W. Zhu, Y. Wang, Y. Shi, Enhanced performance of solar-driven photovoltaic– thermoelectric hybrid system in an integrated design, *Solar Energy* 2013;88:182–19.
- [76] Makki A, Omer S, Sabir H. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;41:658-684.
- [77] Chávez-Urbiola EA, Vorobiev YuV, Bulat, LP. Solar hybrid systems with thermoelectric generators. *Solar Energy* 2012;86:369–378.
- [78] Benghanem M, Al-Mashraqi AA, Daffallah KO. Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites. *Renewable Energy* 2016;89:51-59.
- [79] Cotfas PA, Cotfas DT, Macidon OM, Ciulavu C. Performance evaluation of the thermoelectric generator. *Scientific Research And Education in the Air Force-Afases* 2016, vol II, pp. 349-346, Braşov, România, Ebsco.
- [80] Cotfas DT, Cotfas PA, Macidon OM, Ciobanu D. Investigation of the photovoltaic cell/ thermoelectric element hybrid system performance, *IOP Conference Series:*

- Materials Science and Engineering, Volume 133, conference 1, International Conference on Innovative Research 2016 - ICIR Euroinvent 2016.
- [81] Cotfas DT, Cotfas PA, Study of the photovoltaic/thermoelectric/solar collector - hybrid system, Fourth European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES2016) Istanbul/Turkey on 28-31 August 2016, Proceedings, pp. 571-576.
- [82] Cotfas DT, Cotfas PA, Ciobanu D, Macidon OM. Characterization of Photovoltaic–Thermoelectric–Solar Collector Hybrid Systems in Natural Sunlight Conditions, Journal of Energy Engineering 2017;143(6):04017055.
- [83] Cotfas DT, Cotfas PA, Floroian L, Floroian DI. Study of combined photovoltaic cell/thermoelectric element/solar collector in medium concentrated light, Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 2017 International Conference on, Braşov, România, 2017.
- [84] Mahmoudinezhad S, Rezaia A, Cotfas DT, Cotfas PA, Rosendahl LA. Experimental and numerical investigation of hybrid concentrated photovoltaic – Thermoelectric module under low solar concentration, Energy 159, 1123-1131, 2018.
- [85] Mahmoudinezhad S, Ahmadi Atouei S, Cotfas PA, Cotfas DT, Rosendahl LA, Rezaia A. Experimental and numerical study on the transient behavior of multijunction solar cell-thermoelectric generator hybrid system, Energy Conversion and Management 2019;184:448–455.
- [86] Thermal Electronics Corp. Part# CMO-25-42S, <http://espressomilkcooler.com/wp-content/uploads/2014/06/CMO-25-42S-OXIDE-NEW.pdf>, [accesat în februarie 2019].
- [87] Mahmoudinezhad S, Rezaia A, Cotfas PA, Cotfas DT, Rosendahl LA. Transient behavior of concentrated solar oxide thermoelectric generator, Energy 2019;168: 823-832.
- [88] Cotfas DT, Cotfas PA, Kaplani E, C Samoila C. Monthly average daily global and diffuse solar radiation based on sunshine duration and clearness index for Brasov, Romania, Journal of Renewable and Sustainable Energy 2014;6:053106.
- [89] Cotfas PA, Cotfas DT, Gerigan C, Machidon OM. System design to study hybrid systems in concentrated light using Fresnel lens, 2017 International Conference On Optimization Of Electrical And Electronic Equipment (Optim) & 2017 Intl Aegean Conference On Electrical Machines And Power Electronics (ACEMP), Braşov, România, 2017